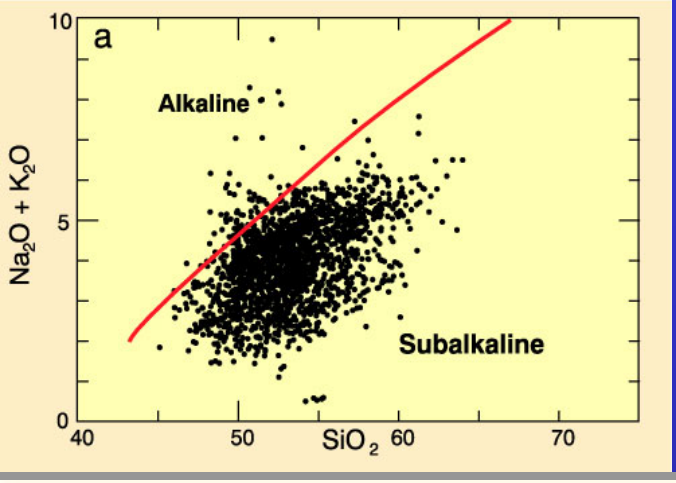
Общая тема:

АКТИВНЫЕ ОКРАИНЫ КОНТИНЕНТОВ

Лекция № 25

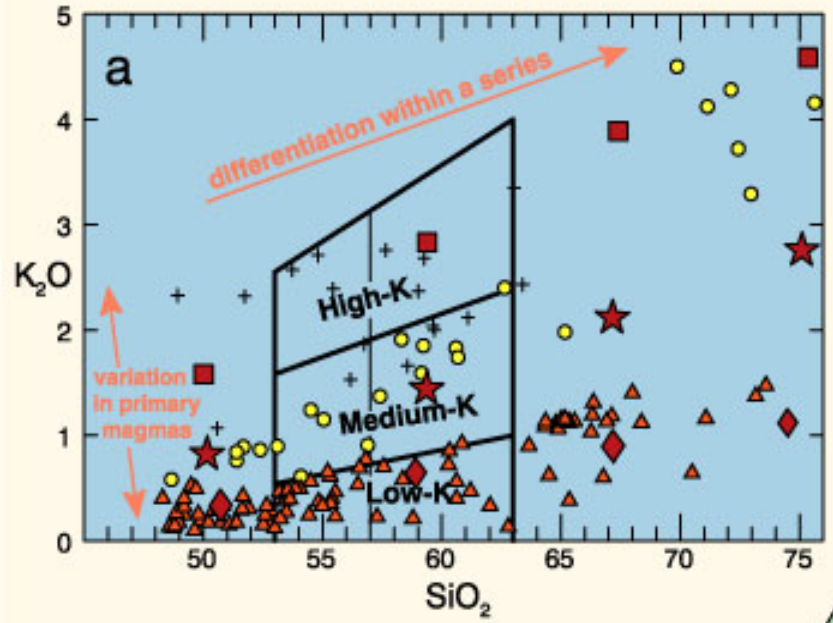
Природа магматизма и происхождение андезит-базальтовых серий островных дуг

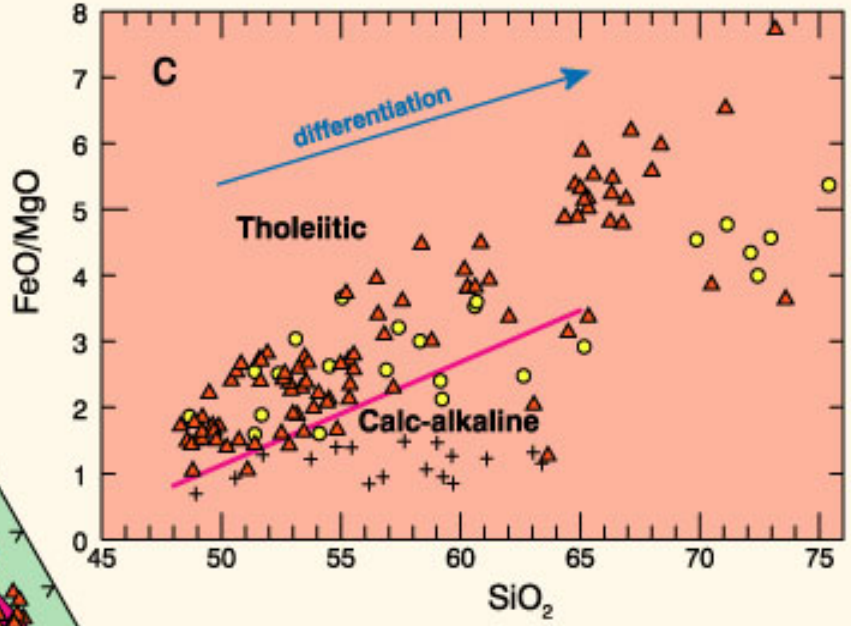
1. ***Петрогеохимическая специфика островодужных серий***
2. ***Механизмы магмообразования***
3. ***Образование высокоглиноземистых базальтов*** *(на примере лав Ключевского вулкана)*
4. ***Формирование андезит-базальтовых серий*** *(на примере влк. Ключевской и Безымянный)*

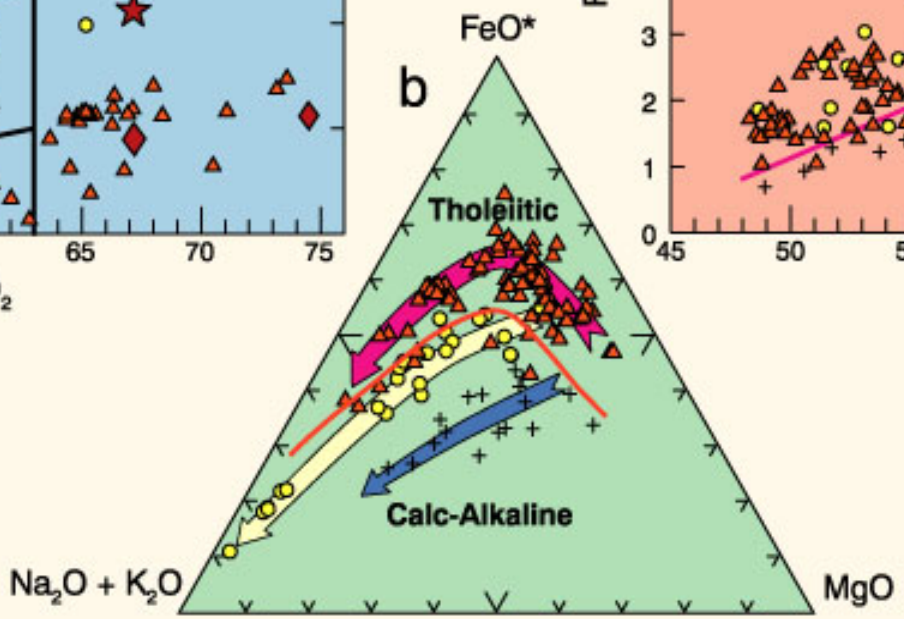


Петрохимическая типизация магматических серий островных дуг

Примеры островодужных серий

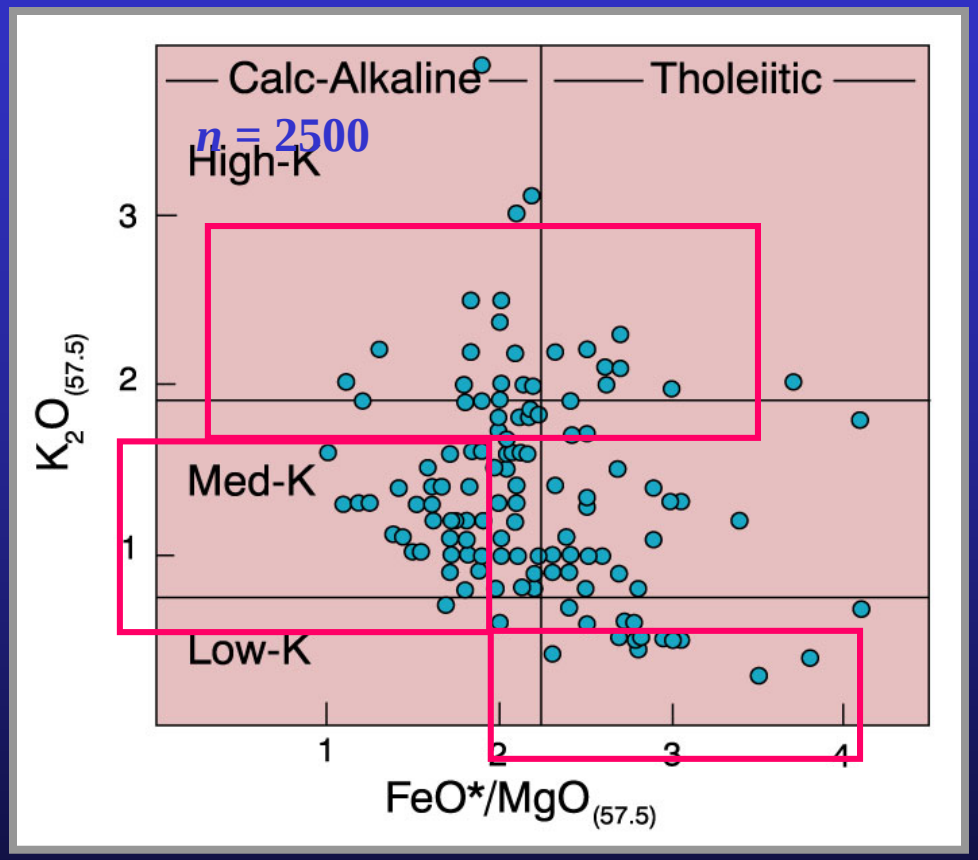


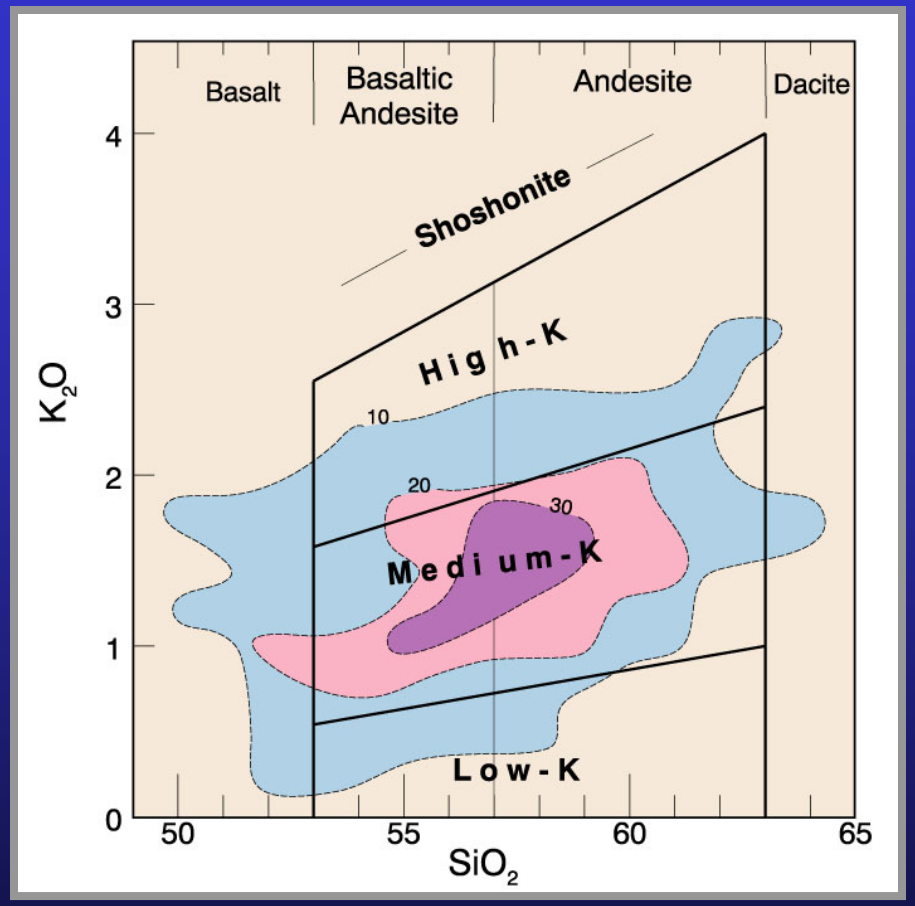




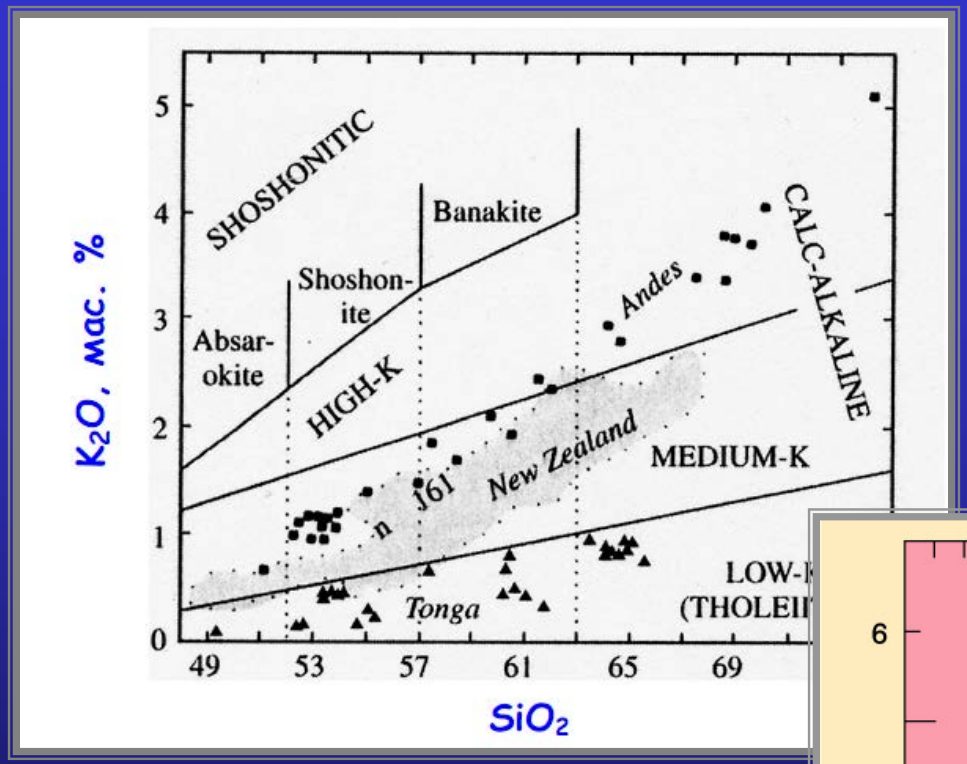
- Tonga-Kermadec
- Guatamala
- Papua New Guinea

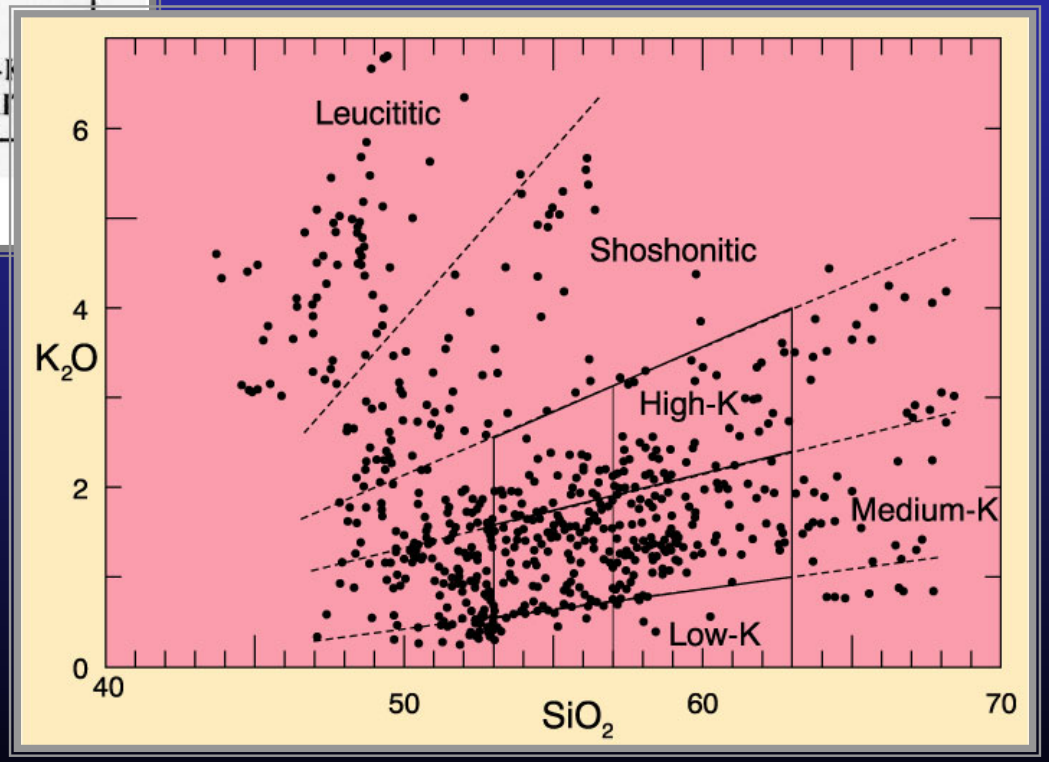
Классификационное значение “калиевости” пород





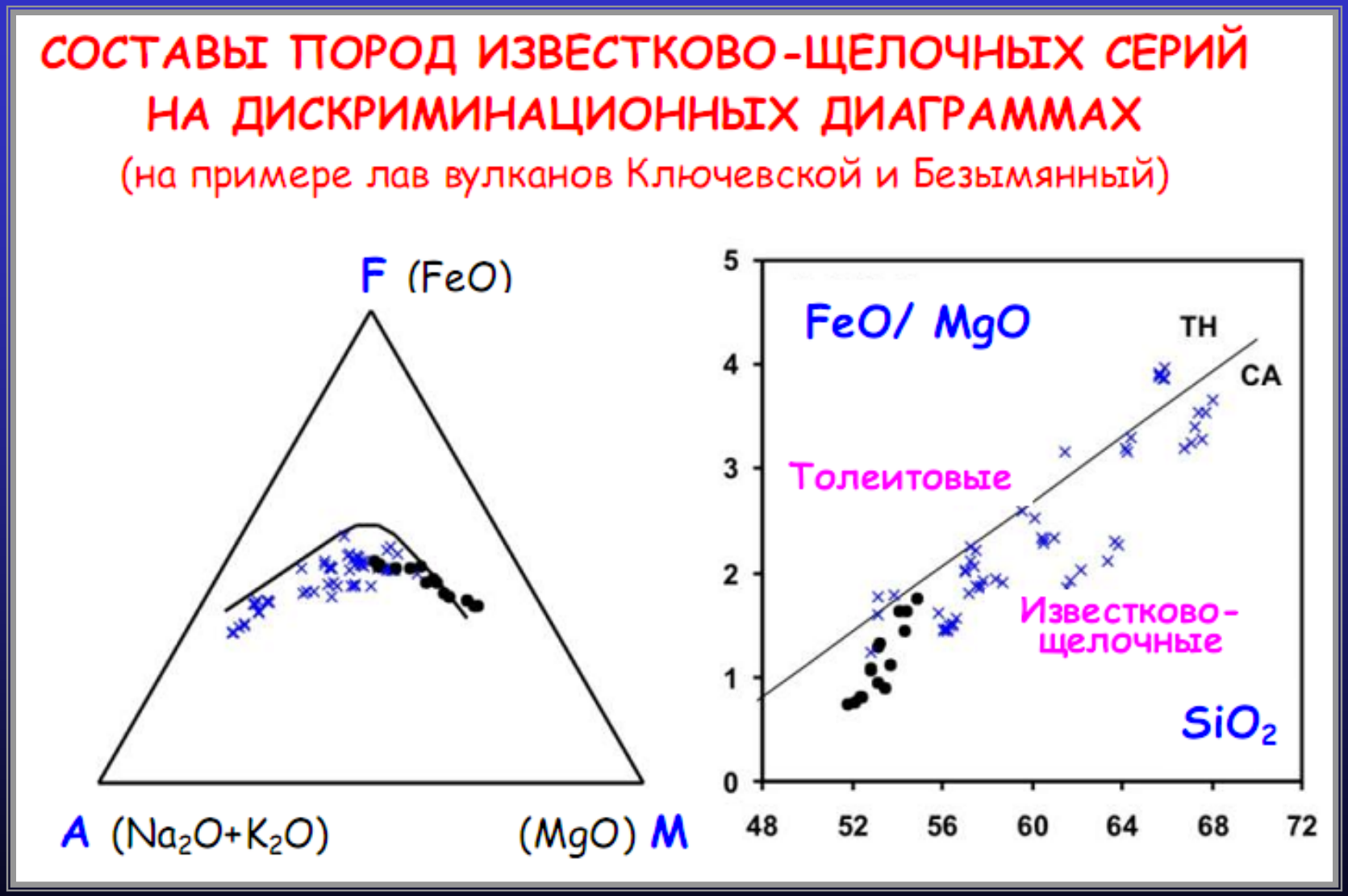
Другие примеры толеитовых и известково-щелочных серий





700 анализов вулканитов дуг Банда и Зондской

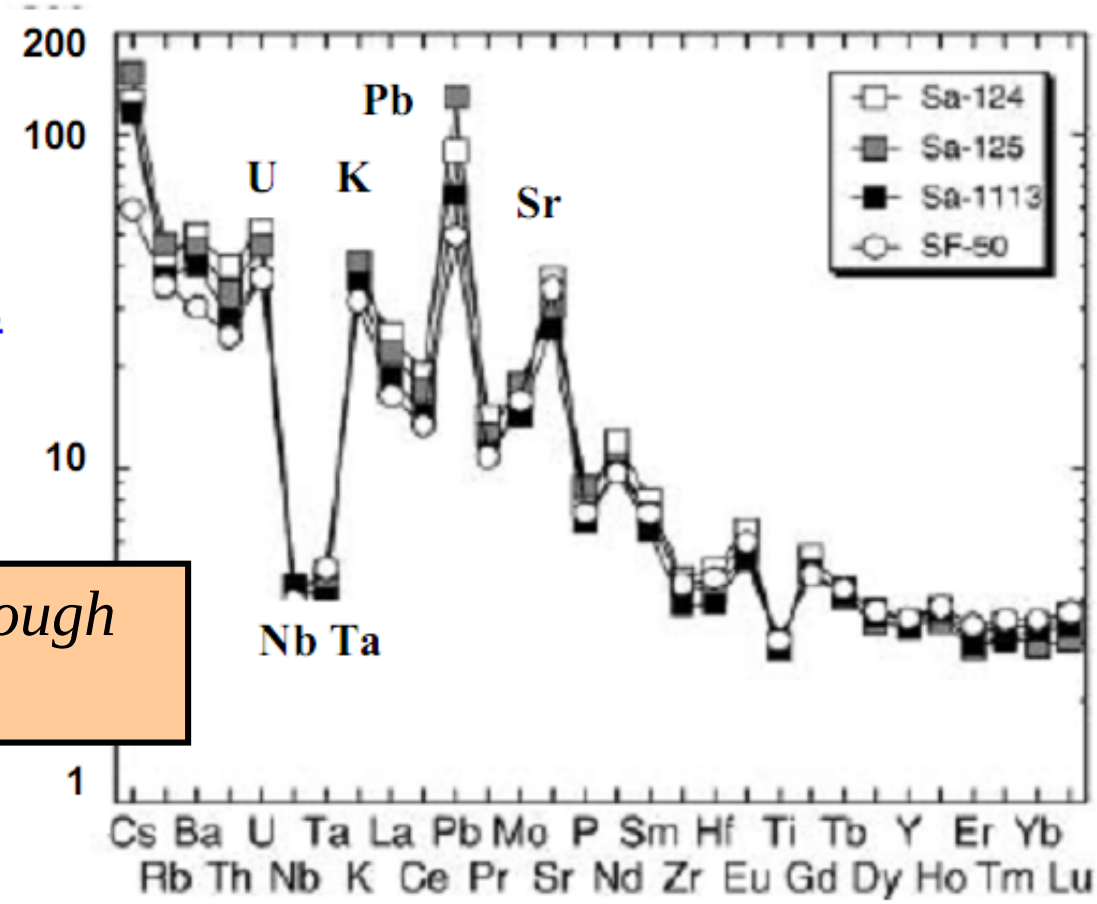
Известково-щелочная серия вулканов Ключевской и Безымянный



	N-MORB	IAT	Med-K CA	Bon
SiO_2	50	49	49	56
TiO_2	1.5	0.5	0.58	0.2
Al_2O_3	17	15	12.4	10.5
FeO	9.0	9.0	10.0	8.0
MnO	0.11	0.2	0.18	0.15
MgO	6.3	10.3	15.3	11.2
CaO	11.8	12.6	11.1	7.4
Na_2O	2.9	1.5	2.0	1.5
K_2O	0.15	0.20	0.9	0.4
P_2O_5	0.14	0.06	0.15	0.02
Ba	6ppm	20	60	30
Nb	3.5ppm	0.6	0.8	1.0

Геохимия пород известково-щелочных серий

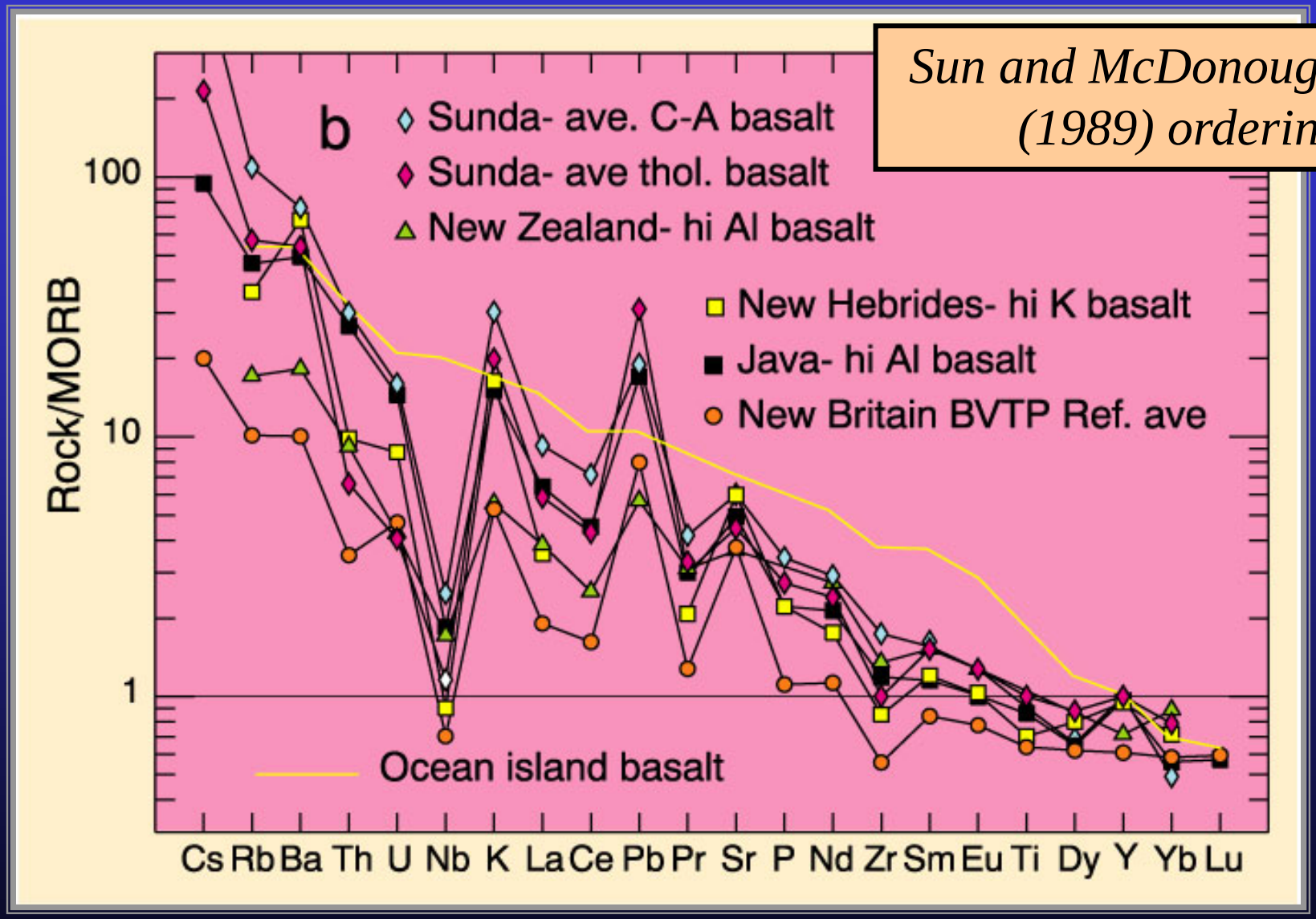
МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОРОДАХ ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ ВУЛКАНА САЛИНА (ЭОЛИЙСКАЯ ДУГА, СИЦИЛИЯ)



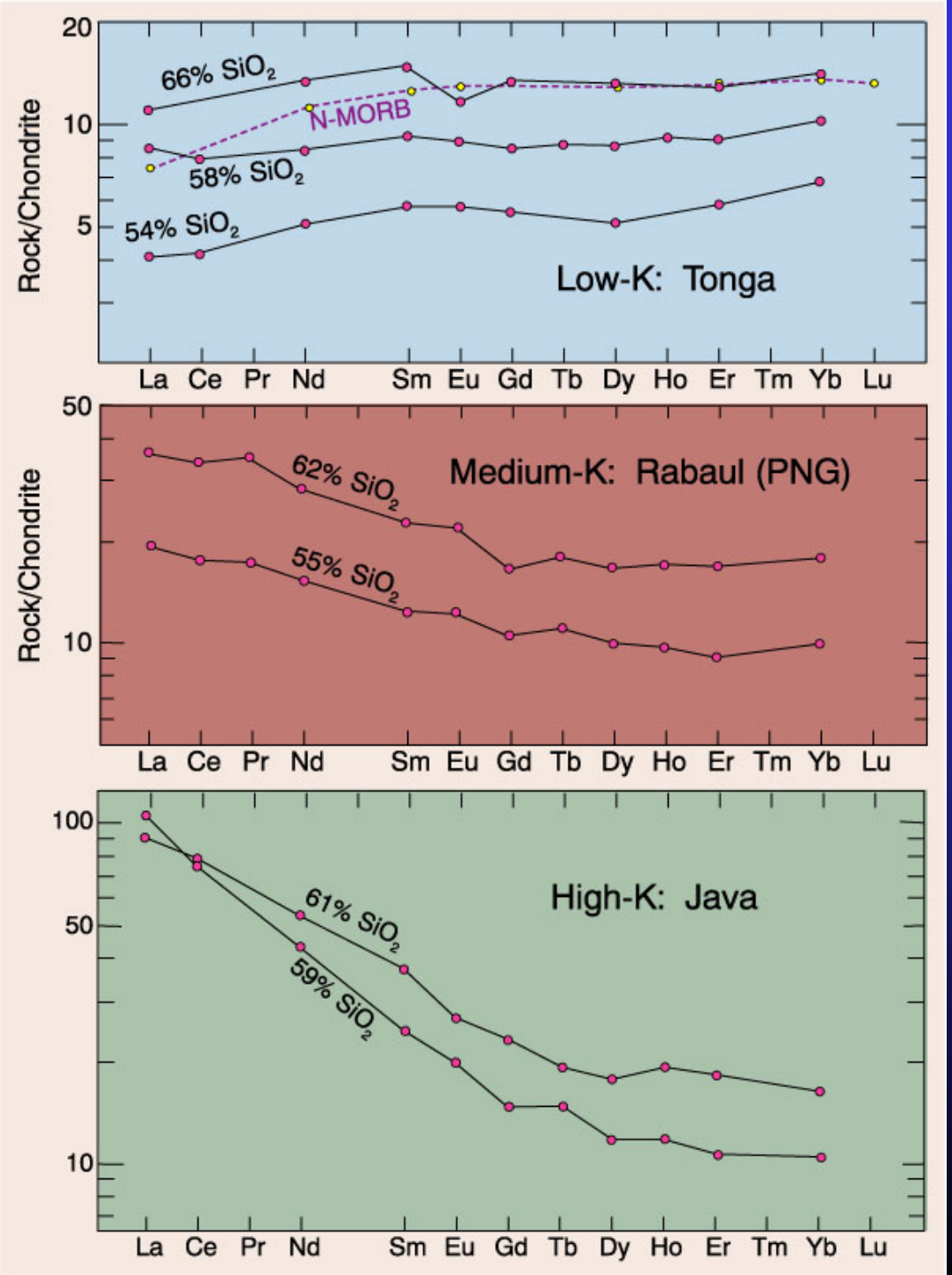
ПОРОДА МАНТИЯ

Sun and McDonough (1989) ordering

Другие примеры известково-щелочных серий



Sun and McDonough (1989) ordering



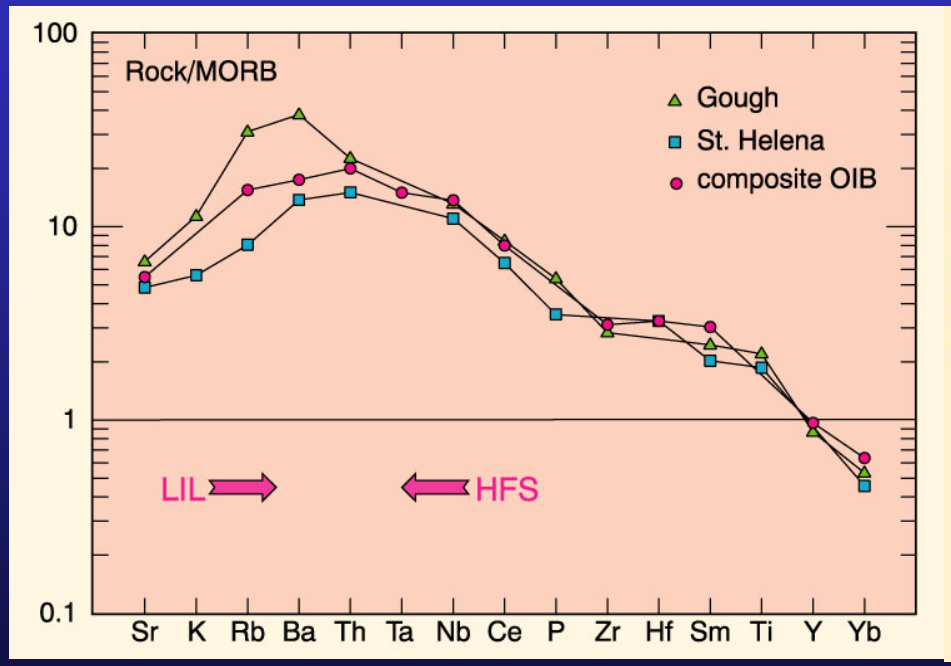
Сравнение серий разной калиевости

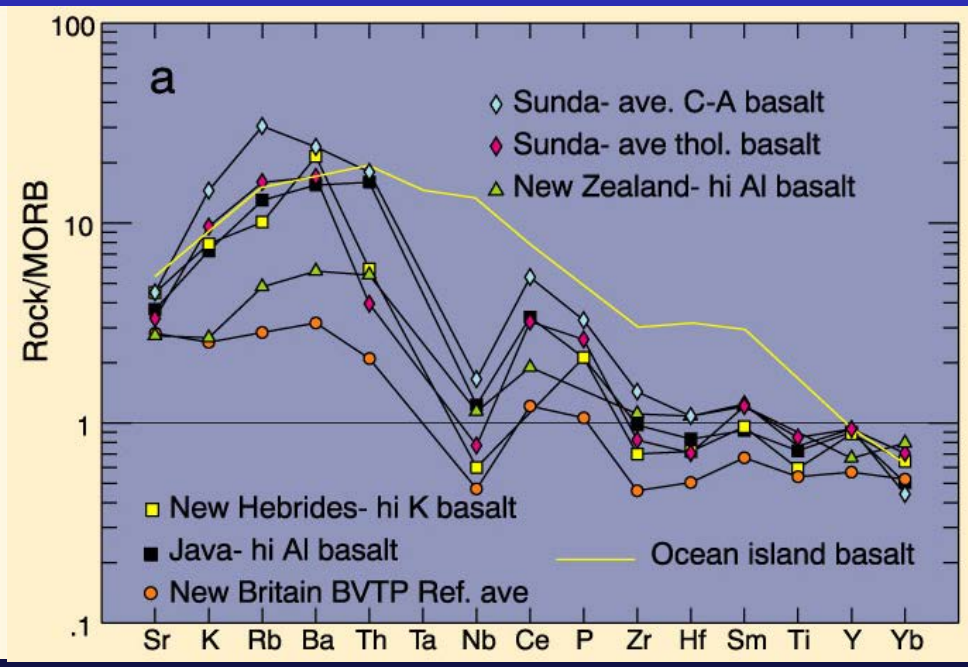
гетерогенный источник
субпараллельные графики
в единых сериях (фракционирование Ol, Cpx, Pl)
истощенный источник низко-К серий
нет обеднения ТРЗЭ - источник выше зоны гранатовых лерцолитов

Сравнение геохимических спектров OIB и известково-щелочных серий островных дуг

Океанические острова

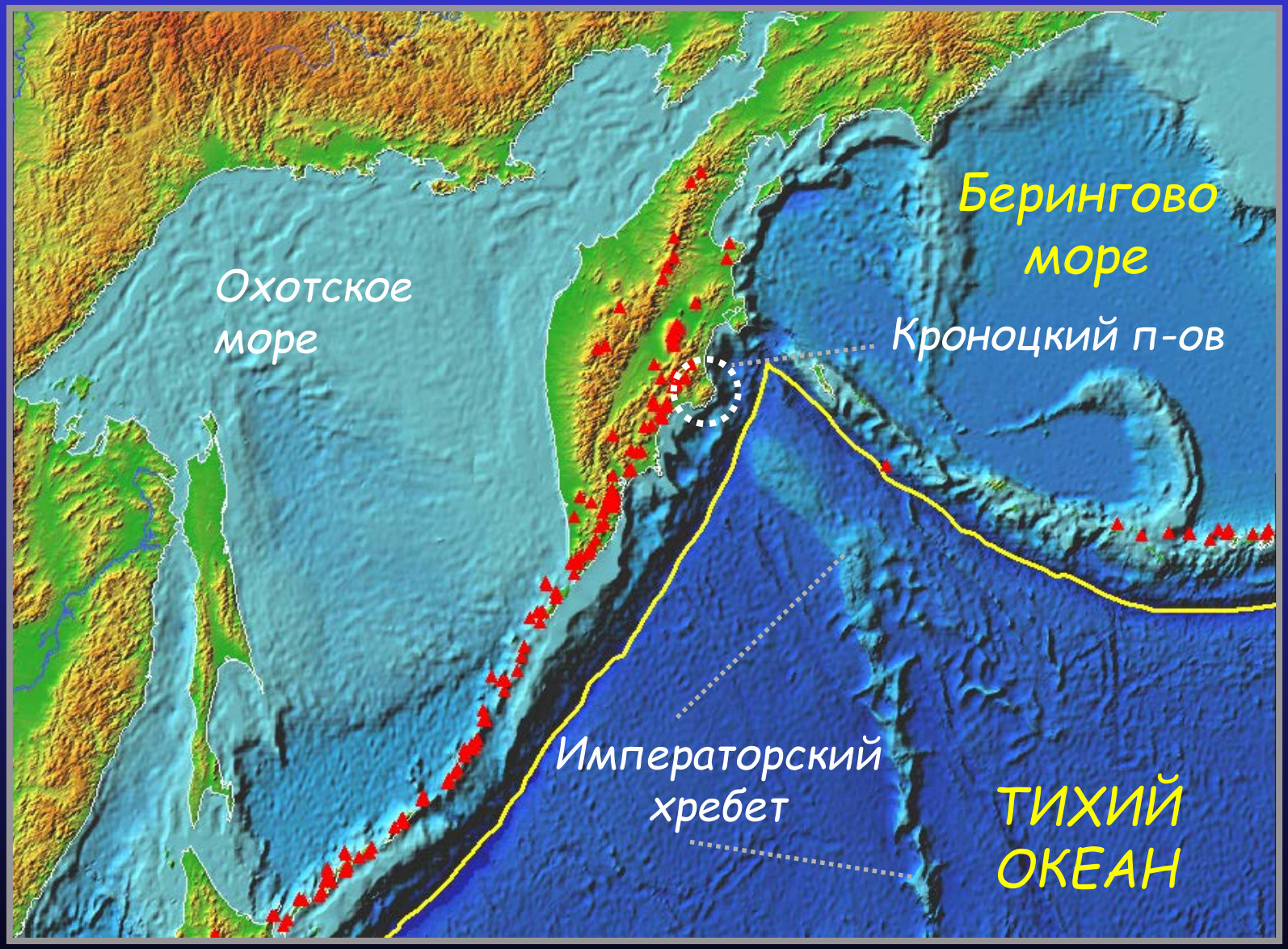
Островные дуги





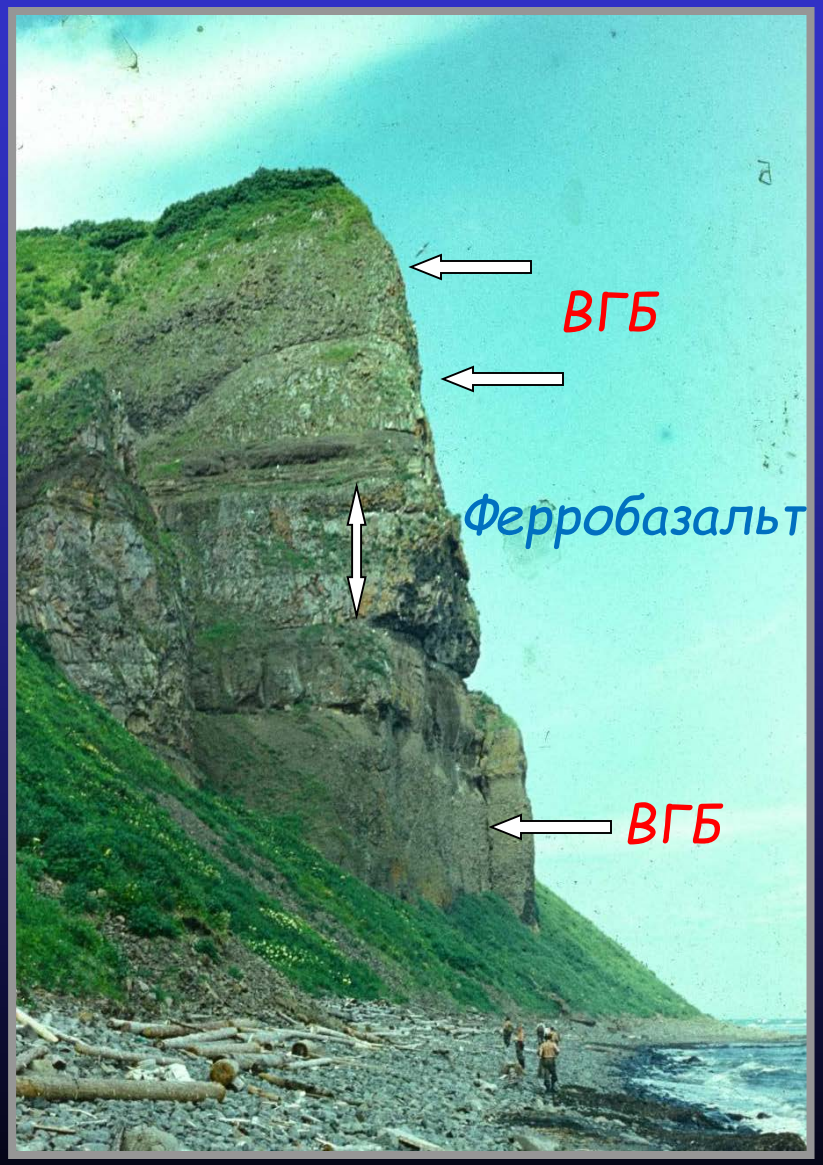
Pearce (1983) ordering

Кроноцкие базальты как пример островодужных толеитов



Переслаивание высоко-Al и ферробазальтов

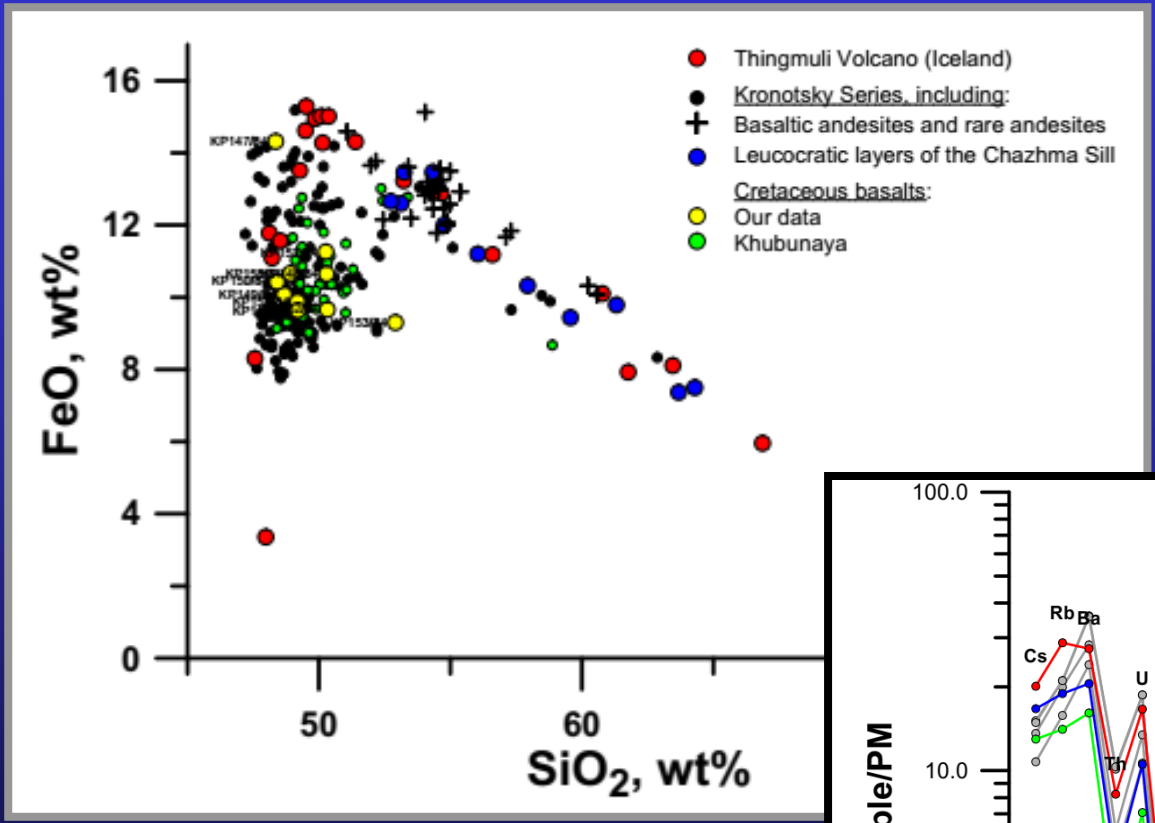
(Кроноцкая серия, Восточная Камчатка)



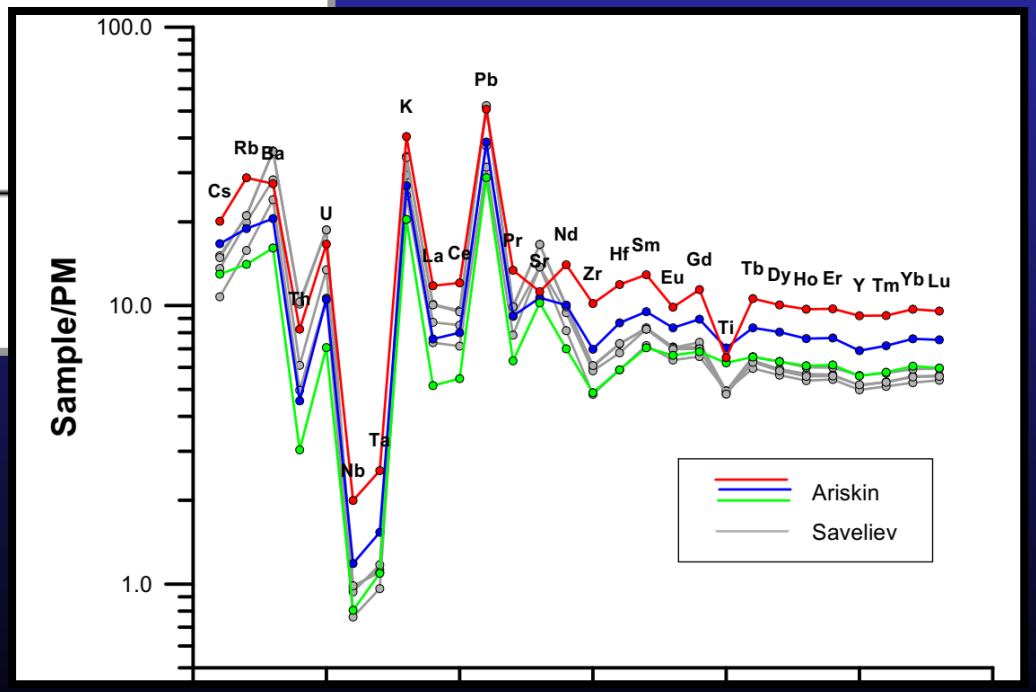
Средние составы базальтов Кроноцкой серии

Оксиды, мас.%	Средний ферробазальт	Средний высоко-Al базальт (ВГБ)
SiO_2	49.86	49.16
TiO_2	1.16	0.77
Al_2O_3	15.70	20.72
FeO	13.45	9.76
MnO	0.24	0.16
MgO	5.87	4.30
CaO	10.80	12.19
Na_2O	1.97	2.14
K_2O	0.48	0.42
P_2O_5	0.21	0.17
mg#	0.437	0.440

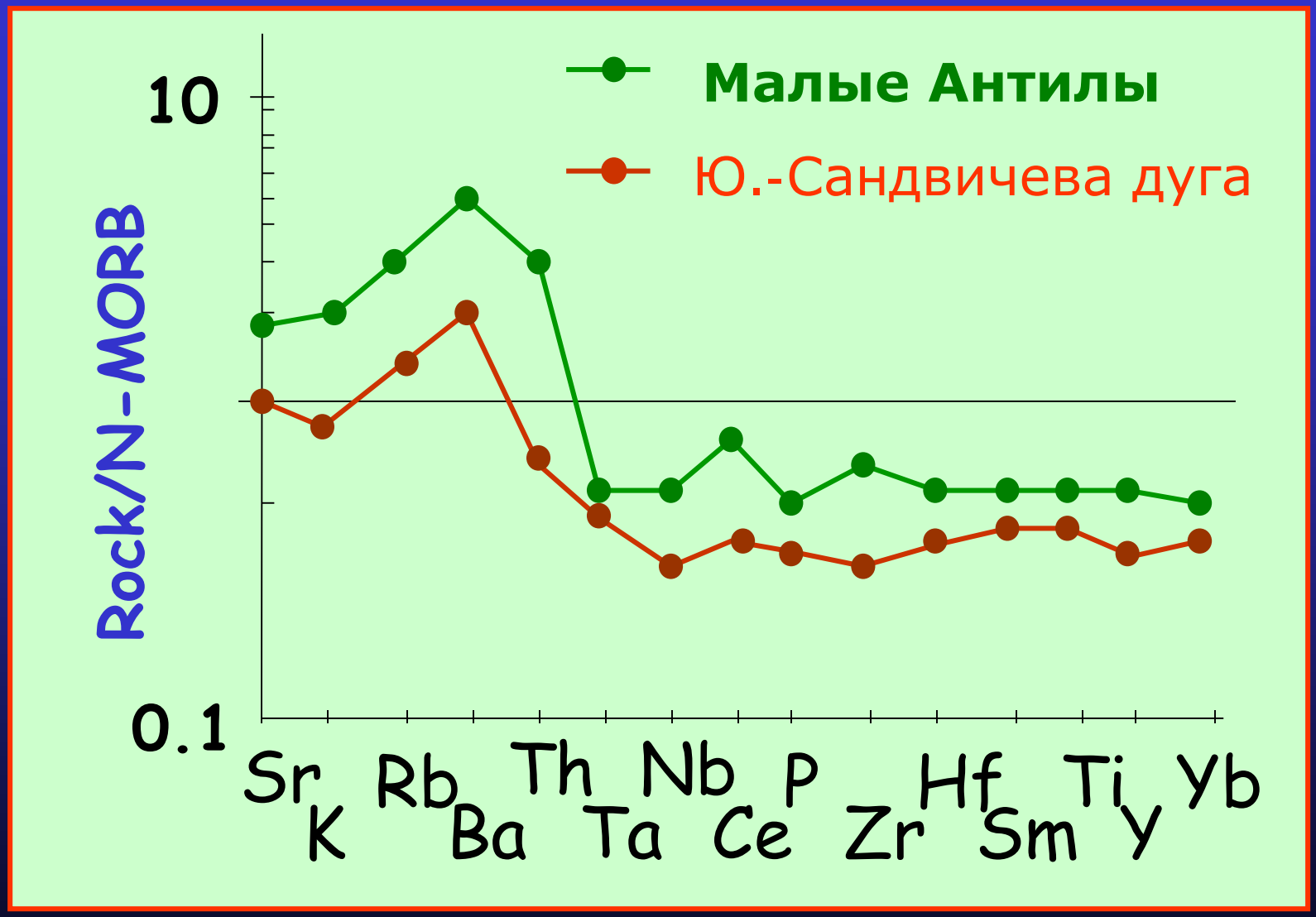
Геохимия пород толеитовых серий энсиалических островных дуг



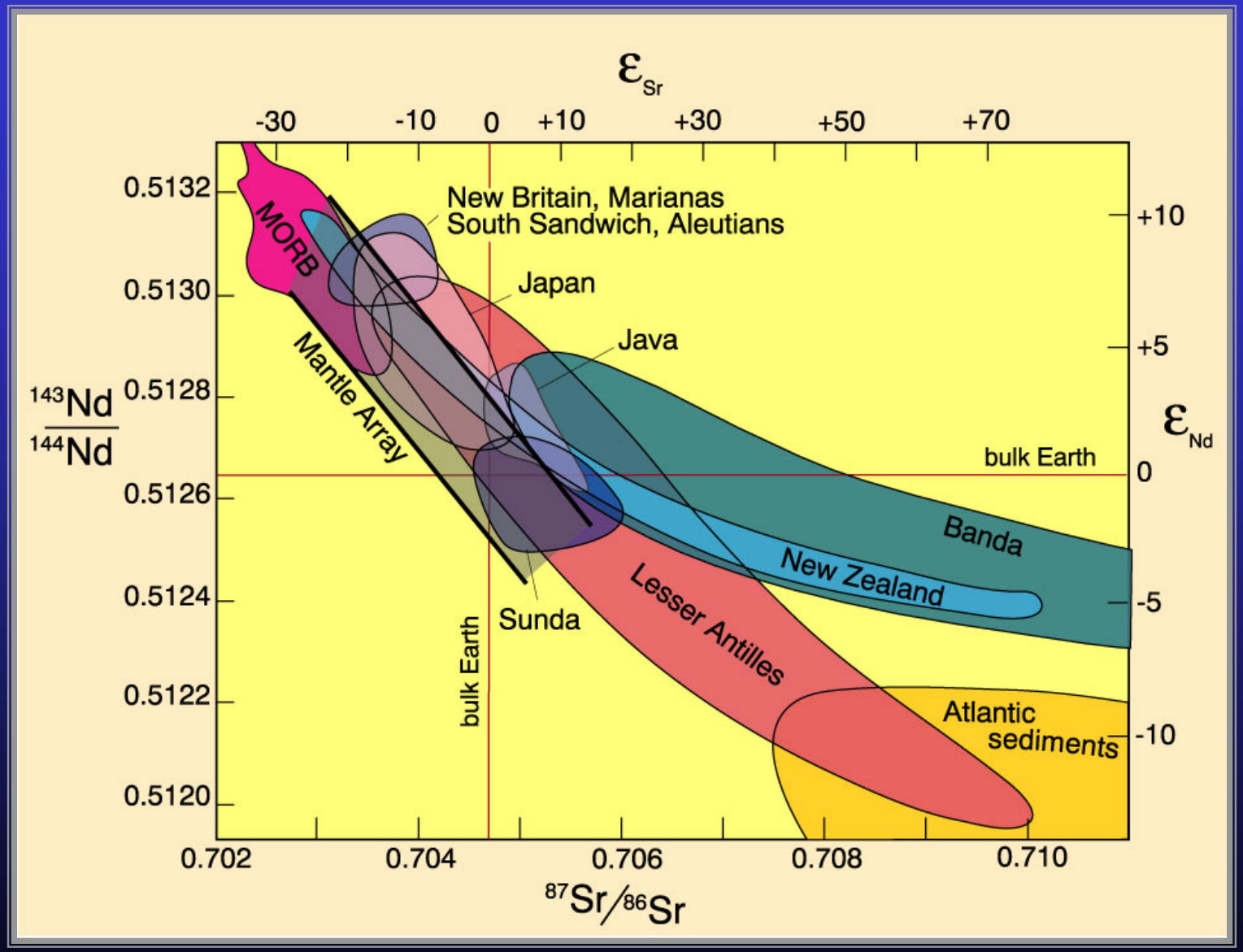
Чажмиский силл



Геохимия пород энсиматических островных дуг



Sr-Nd систематика островодужных серий



Происхождение андезит-базальтовых серий островных дуг

1. ***Высокоглиноземистых базальты и гиперстеновые серии***
2. ***Значение высокомагнезиальных базальтов***
3. ***Гипотеза плавления “мантийного клина”***
4. ***Летучие как главный фактор магмообразования***
5. ***Роль воды в образовании высоко-Al магм***
6. ***Формирование андезит-базальтовых серий*** *(на примере лав влк. Безымянный)*

Высокоглиноземистый базальт и гиперстеновые серии

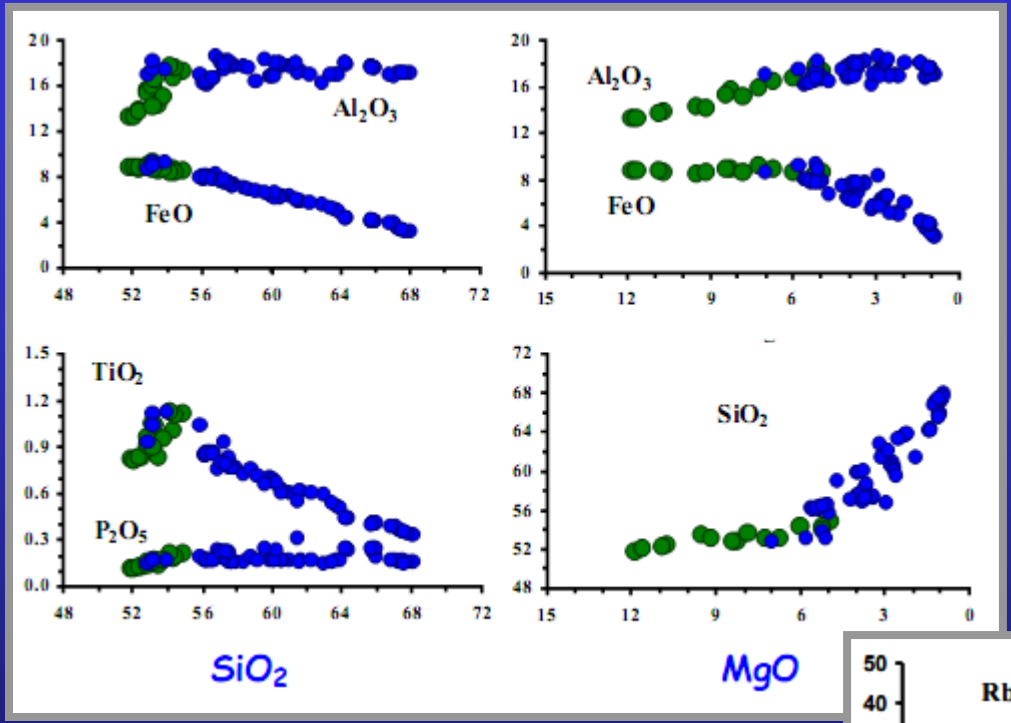
Породы этого типа характеризуются высоким содержанием глинозема (> 18 мас.% Al_2O_3) и присутствием OPX в основной массе.

Куно (Kuno, 1960) объединил высокоглиноземистые базальты и продукты их фракционирования в *гиперстеновую серию*, которая позднее была признана аналогом известково-щелочной серии.

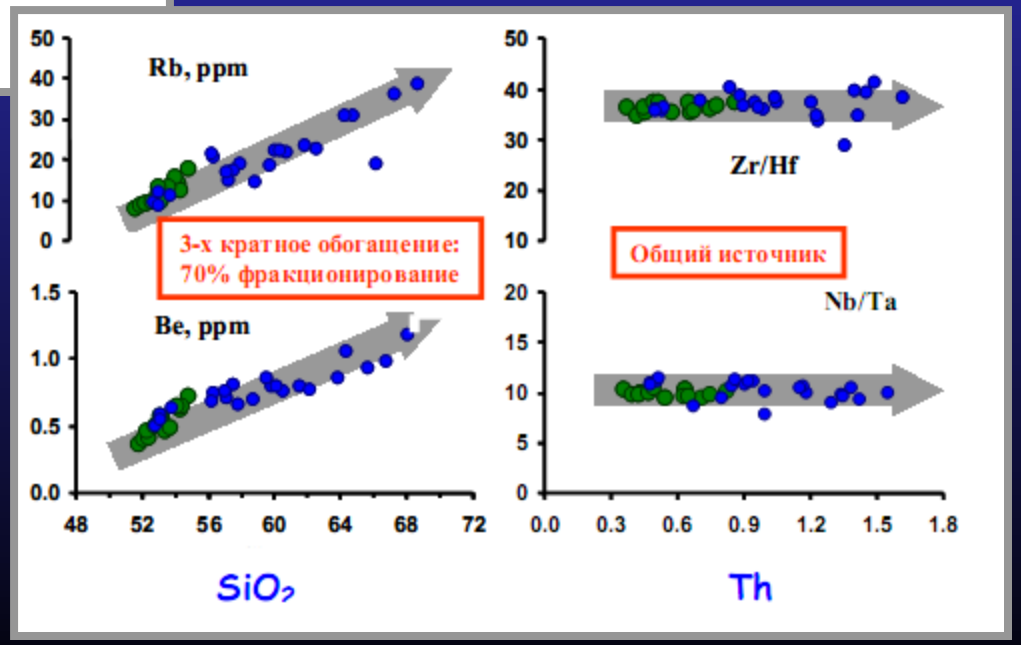
Ассоциациям этого типа противопоставлялись породы пижонитовой серии, в основной массе которых присутствует Pig – “островодужные толеиты”.

Куно утверждал, **что породы гиперстеновых серий являются продуктами кристаллизации высокоглиноземистой магмы, которую можно рассматривать как исходную для любых известково-щелочных ассоциаций пород.**

Пример “полной” известково-щелочной серии

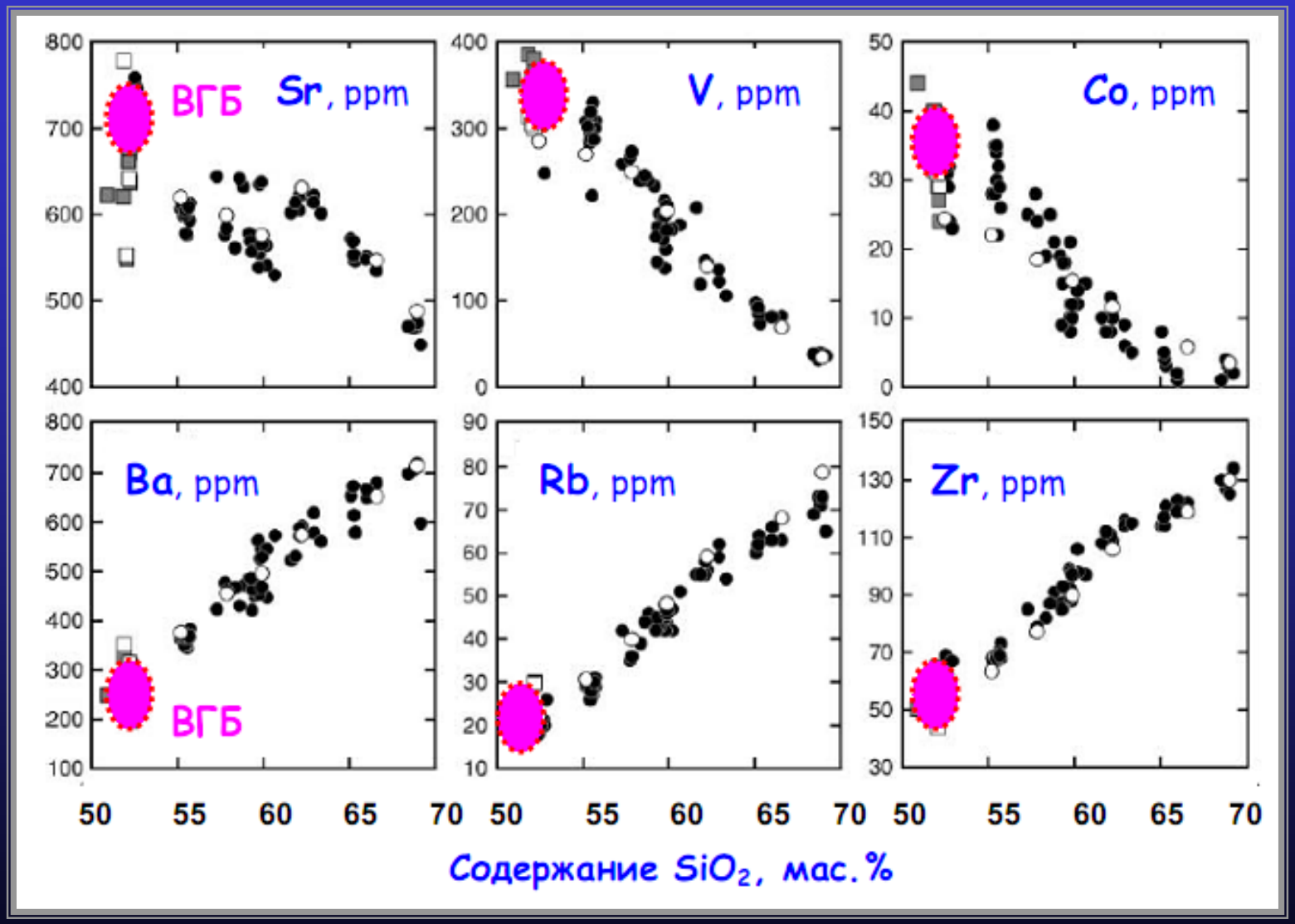


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ (●) И БЕЗЫМЯННЫЙ (●)

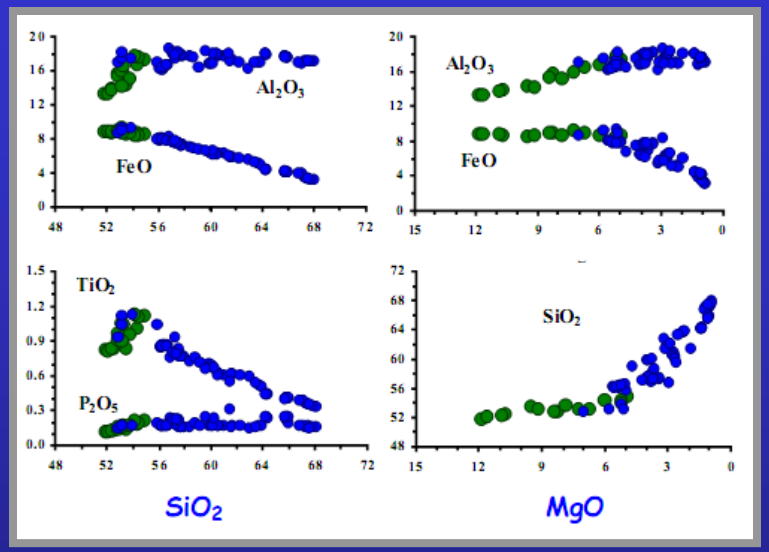


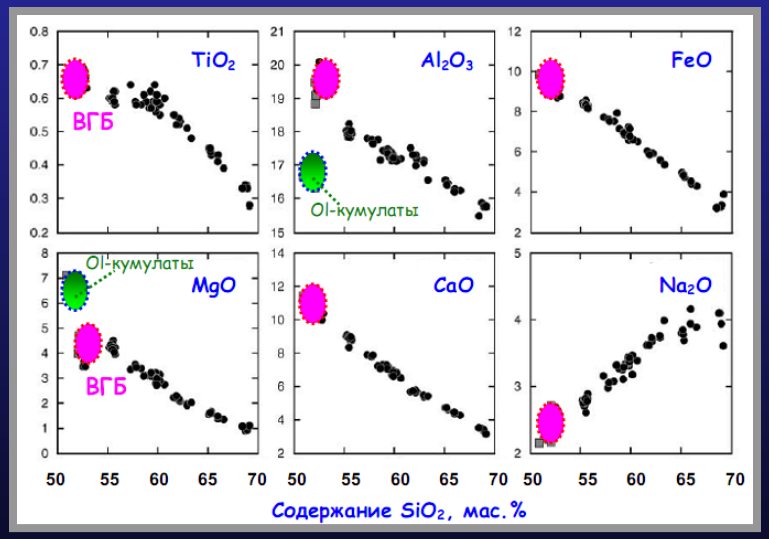
Типичная известково-щелочная серия

(вулкан Салина, Эоловая дуга, Сицилия)



Значение высокомагнезиальных базальтов

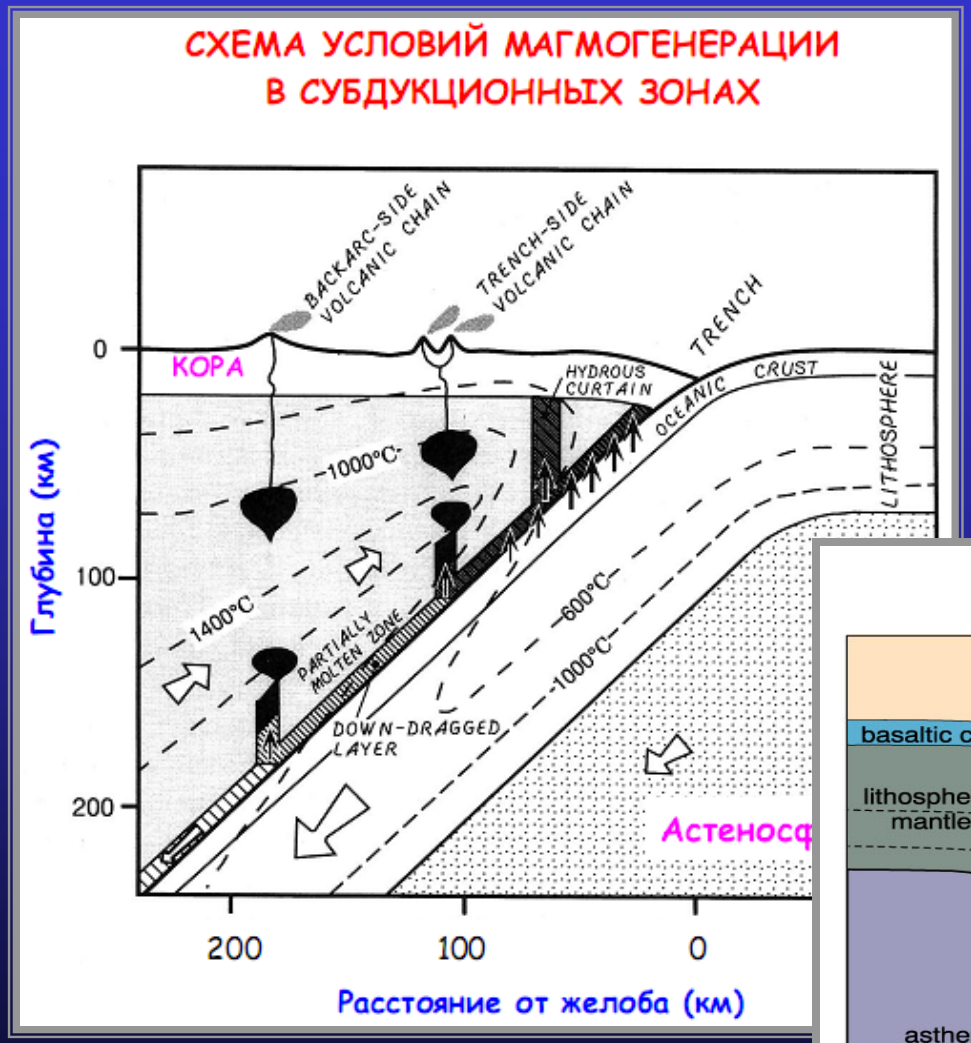




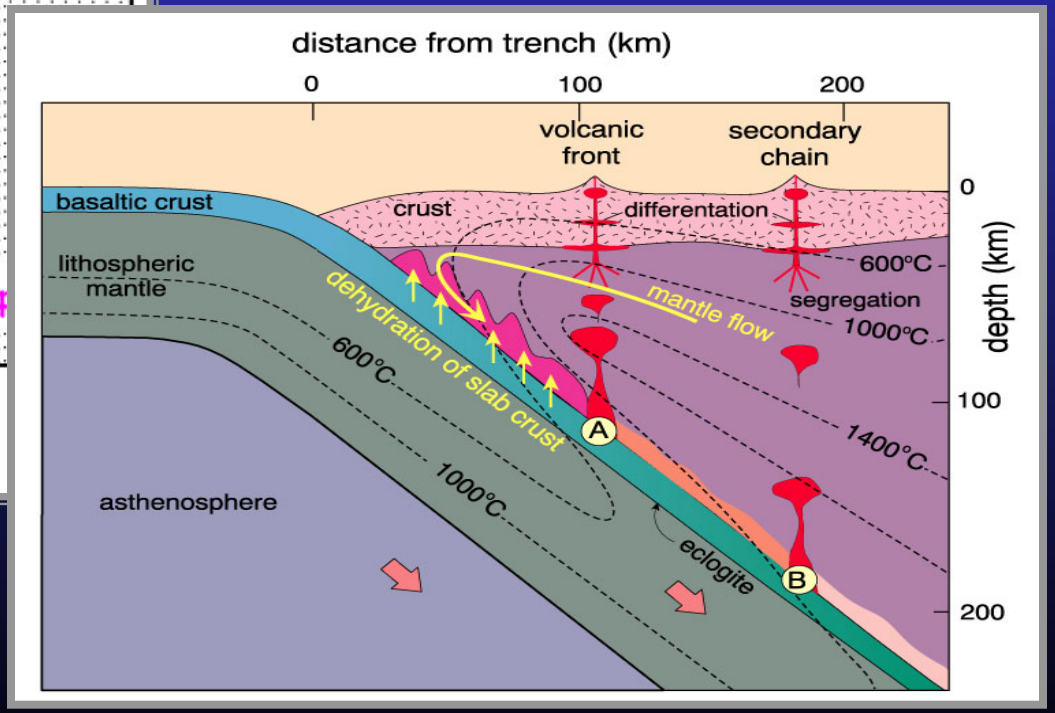
ПРИМЕРЫ АССОЦИАЦИЙ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ И ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ БАЗАЛЬТОВ

ОКСИДЫ	Алеутская дуга		Марианская дуга		Влк. Ключевской	
	Высоко-Mg	Высоко-Al	Высоко-Mg	Высоко-Al	Высоко-Mg	Высоко-Al
SiO_2	48.50	50.13	48.83	50.15	51.76	53.50
TiO_2	0.75	0.97	0.69	0.81	0.86	1.09
Al_2O_3	14.83	**19.34**	15.21	**19.34**	13.86	**18.26**
FeO	9.54	9.03	9.75	9.34	8.83	8.67
MnO	0.17	0.17	0.24	0.16	0.17	0.16
MgO	**11.67**	5.00	**10.11**	4.51	**11.55**	5.24
CaO	11.18	10.51	12.17	11.11	9.73	8.22
Na_2O	2.04	2.88	1.68	2.47	2.47	3.45
K_2O	0.65	0.71	0.58	0.72	0.63	1.20
P_2O_5	0.15	0.18	0.10	0.15	0.15	0.20

Гипотеза плавления "мантийного клина"



Павление мантийного вещества на глубинах около 100 км вблизи верхнего контакта погружающейся плиты могло привести к формированию высоко-Mg магм, которые явились исходными для менее примитивных высоко-Al расплавов.



A – разложение амфибола,
B – разложение флогопита
(Tatsumi, 1989)

Земные геотермы и условия начального плавления мантийных перидотитов

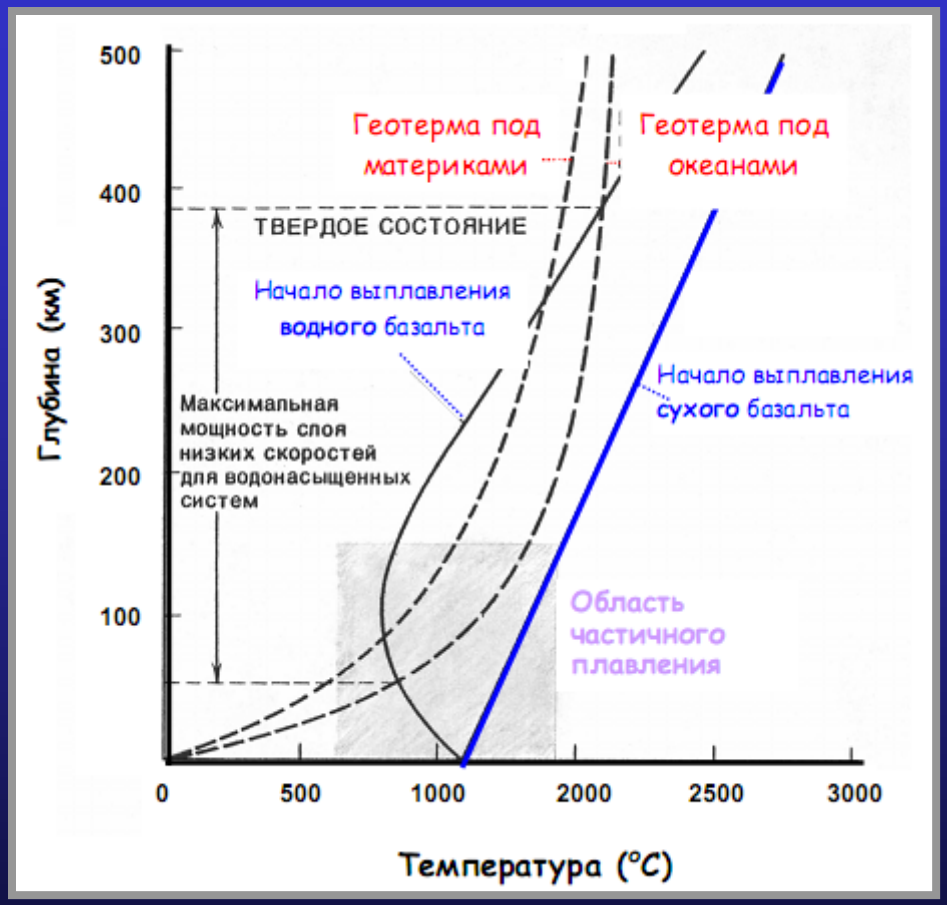
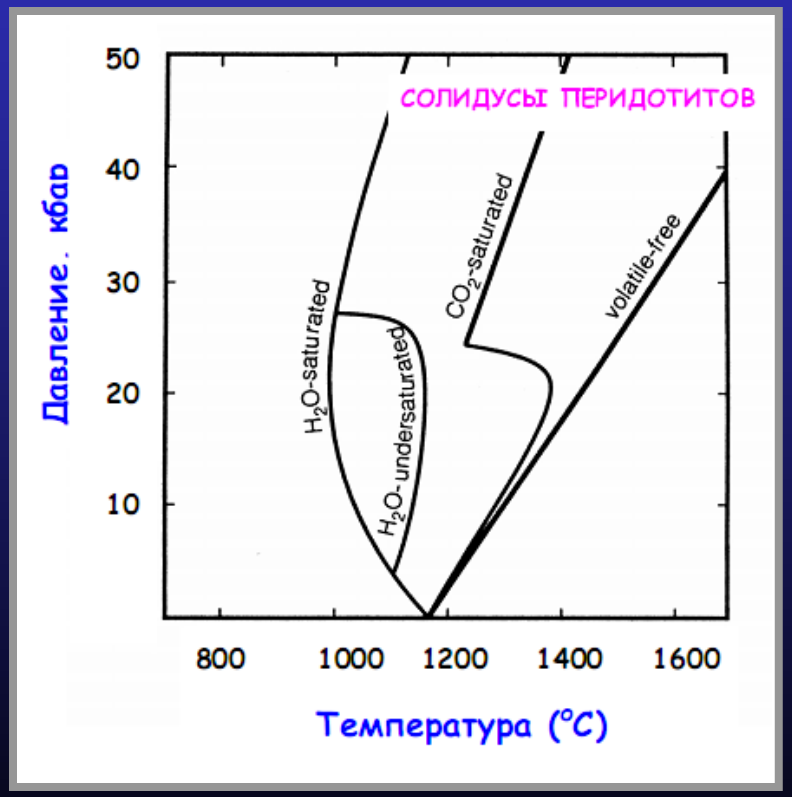


Схема влияния H_2O и CO_2



Присутствие летучих как главный фактор магмообразования

Именно **“летучие” компоненты океанической плиты способствуют зарождению долгоживущих областей плавления** мантийного клина.

В пределах этих зон идет генерация первичных магм высоко-Mg базальтов, **последующее фракционирование которых приводит к образованию дифференциатов высокоглиноземистого состава**.

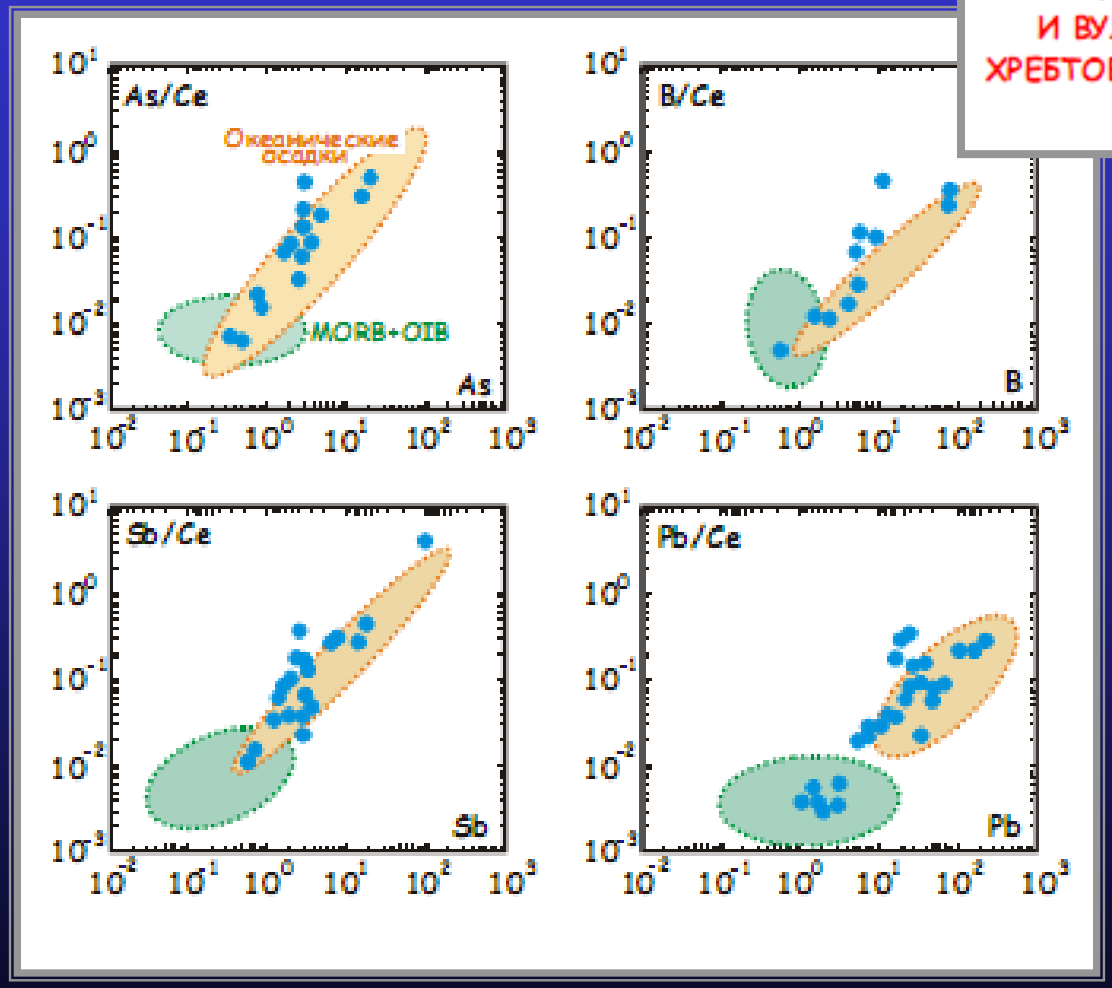
Эти обогащенные Al_2O_3 производные магмы и более кислые продукты их кристаллизации достигают верхних горизонтов коры и извергаются на вулканах субдукционных зон.

А вот **исходные высоко-Mg расплавы – редкий гость на поверхности.** По-видимому, они практически нацело фракционируют при подъеме с глубин магмогенерации.

“Память” о мантийной предыстории несут лишь отдельные фенокристаллы и микровключения высоко-Mg оливинов, пироксенов и хромистой шпинели.

Признаки присутствия компонентов осадочного материала в источнике магм

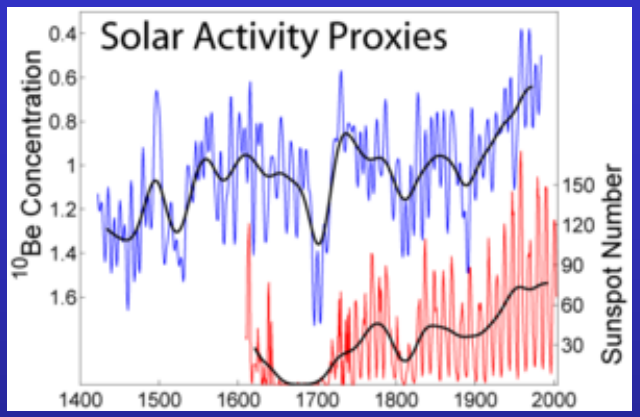
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ AS, B, SB И PB В МЕТАОСАДКАХ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ СРЕДИННЫХ ХРЕБТОВ (MORB), ОКЕАНИЧЕСКИХ О-ВОВ (OIB) И ОСТРОВНЫХ ДУГ (●)



B – подвижный элемент

- *в современных осадках 50-150 г/т*
- *в измененной океанической коре 10-300 г/т*
- *в MORB и OIB редко выше 2-3 г/т*

Признаки присутствия компонентов осадочного материала в источнике магм



Plot showing variations in solar activity, including variation in ^{10}Be concentration which varies inversely with solar activity. (Note that the beryllium scale is inverted, so increases on this scale indicate lower beryllium-10 levels).

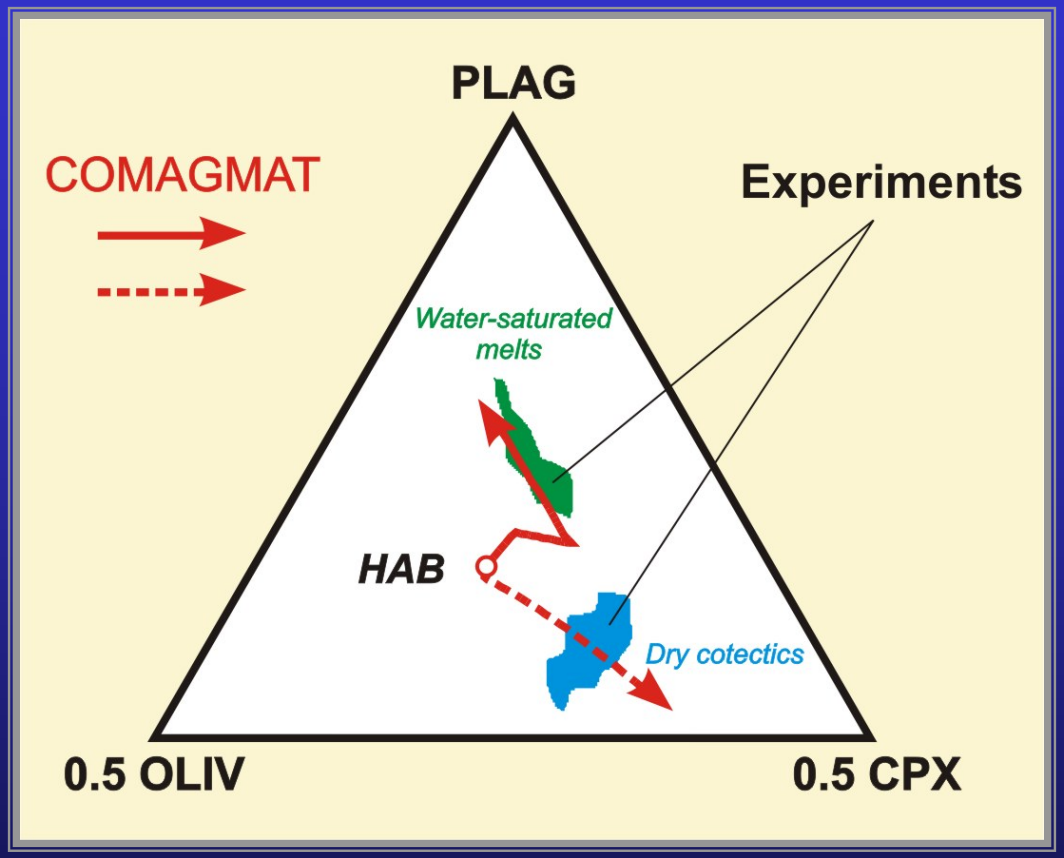
$$^{10}Be \rightarrow {}^{10}B + e$$

Beryllium-10 has a half-life of 1.39×10^6 years

^{10}Be - продукт воздействия космических лучей на кислород и азот верхних слоев атмосферы

- **концентрируется в глинистых глубоководных осадках ($^{10}Be/^{9}Be$ = 5000×10^{-11})**
- **полураспад - 1.5 млн лет (через 10 млн лет - ниже предела обнаружения)**
- **в MORB и OIB: $^{10}Be/^{9}Be < 5 \times 10^{-14}$**

Роль воды в образовании высоко-Al магм

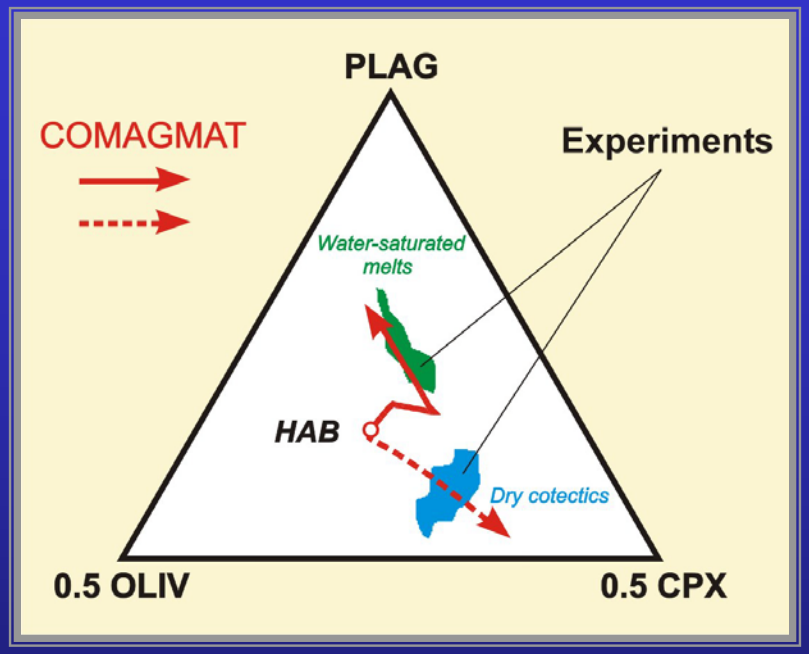


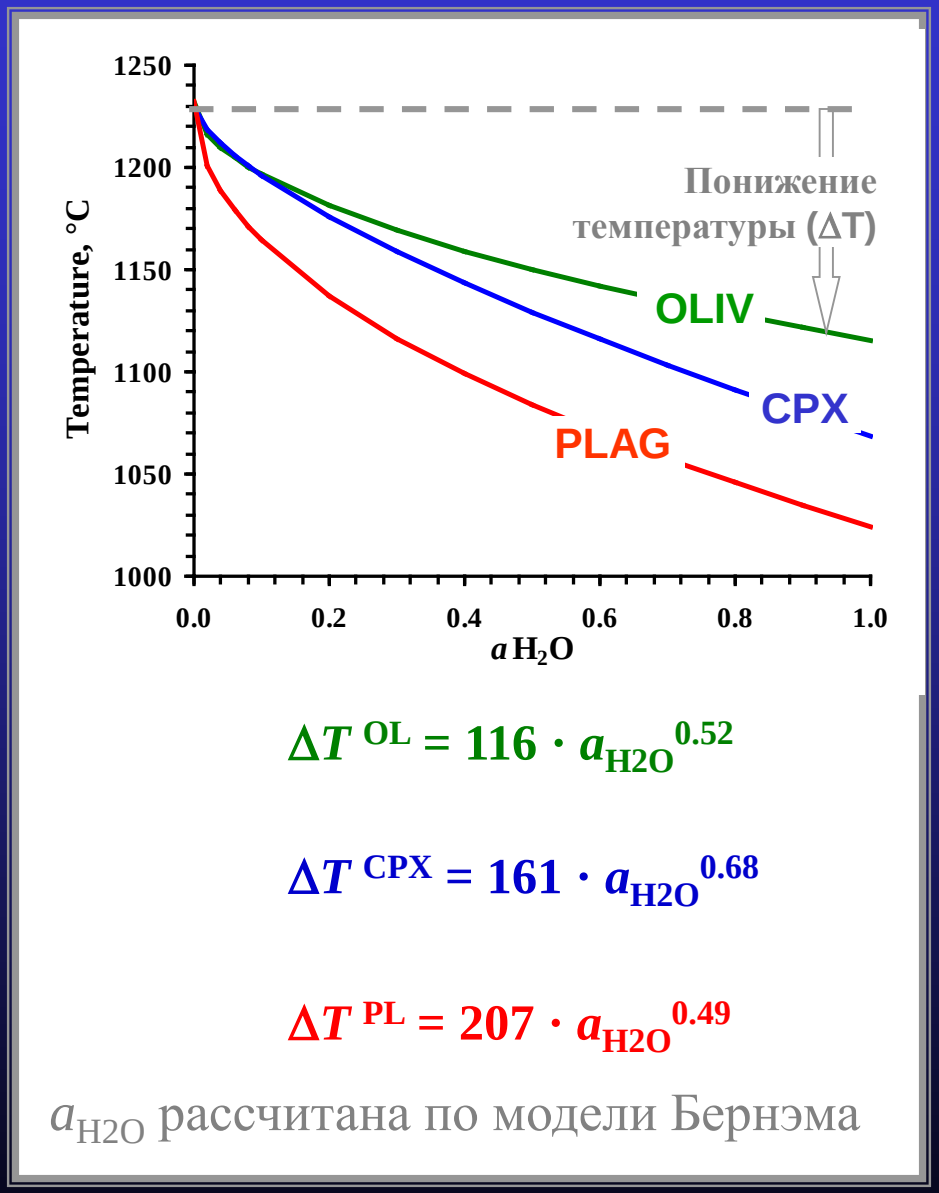
Проекция составов расплавов на диаграмму OLIV-PLAG-CPX

Две модельные линии - результаты расчетов равновесной кристаллиза-ции высокоглиноземистого базальта в “сухих” и “водных” условиях (*при P=2 кбар*).

Эволюция “сухих” расплавов приводит в поле обедненных Al_2O_3 котектик; “водный тренд” направлен в область высоко-Al и водонасыщенных систем.

Экспериментальные исследования водосодержащих базальтовых расплавов (Р.Р.Альмеев,1996-2011)





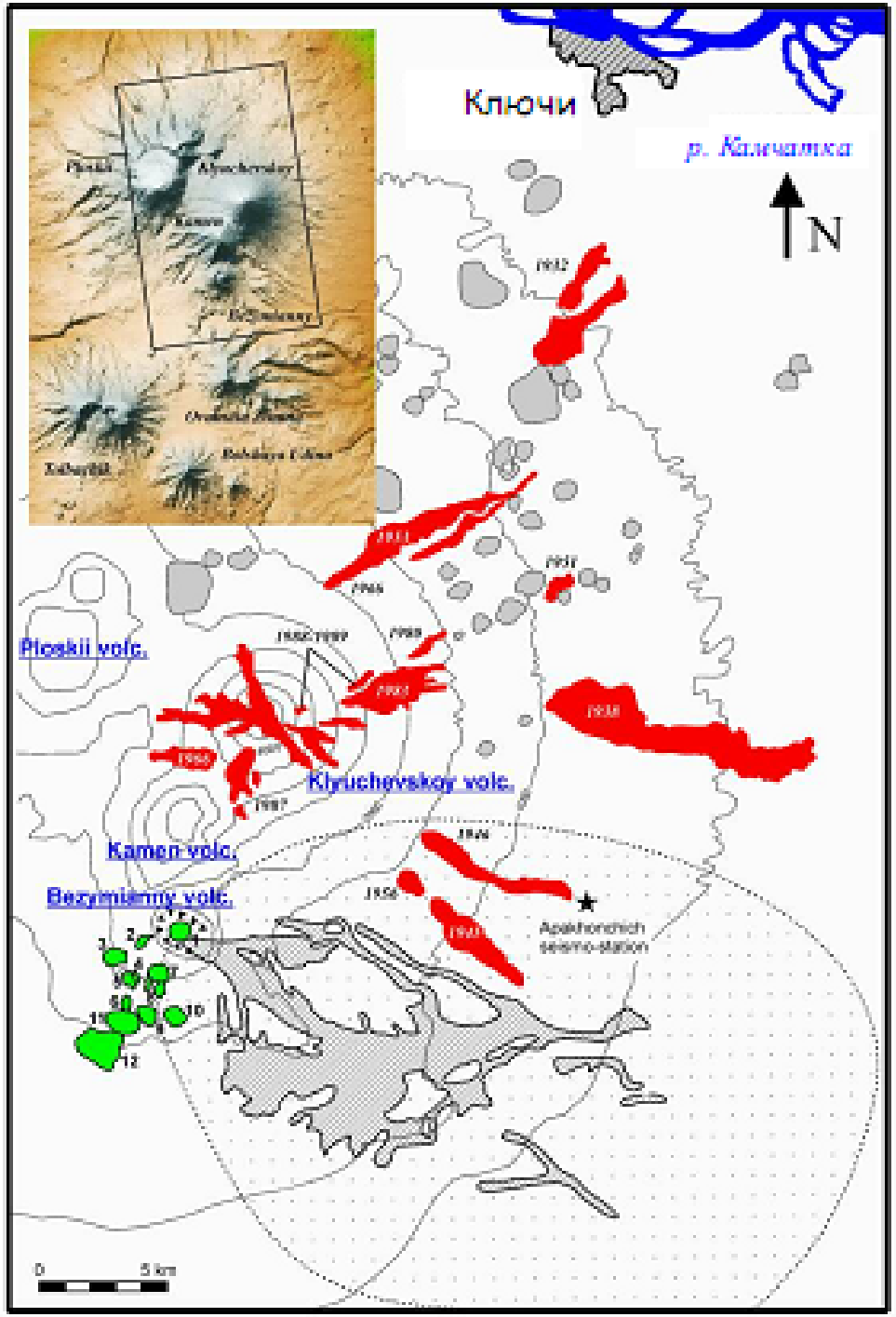
Добавление воды понижает температуру кристаллизации *Pl* значительно сильнее, чем для оливина и пироксенов.

Это понижение составляет порядка 50-100°C на 1% растворенной в расплаве воды.

Формирование андезит-базальтовой серии вулканов Ключевской и Безымянный

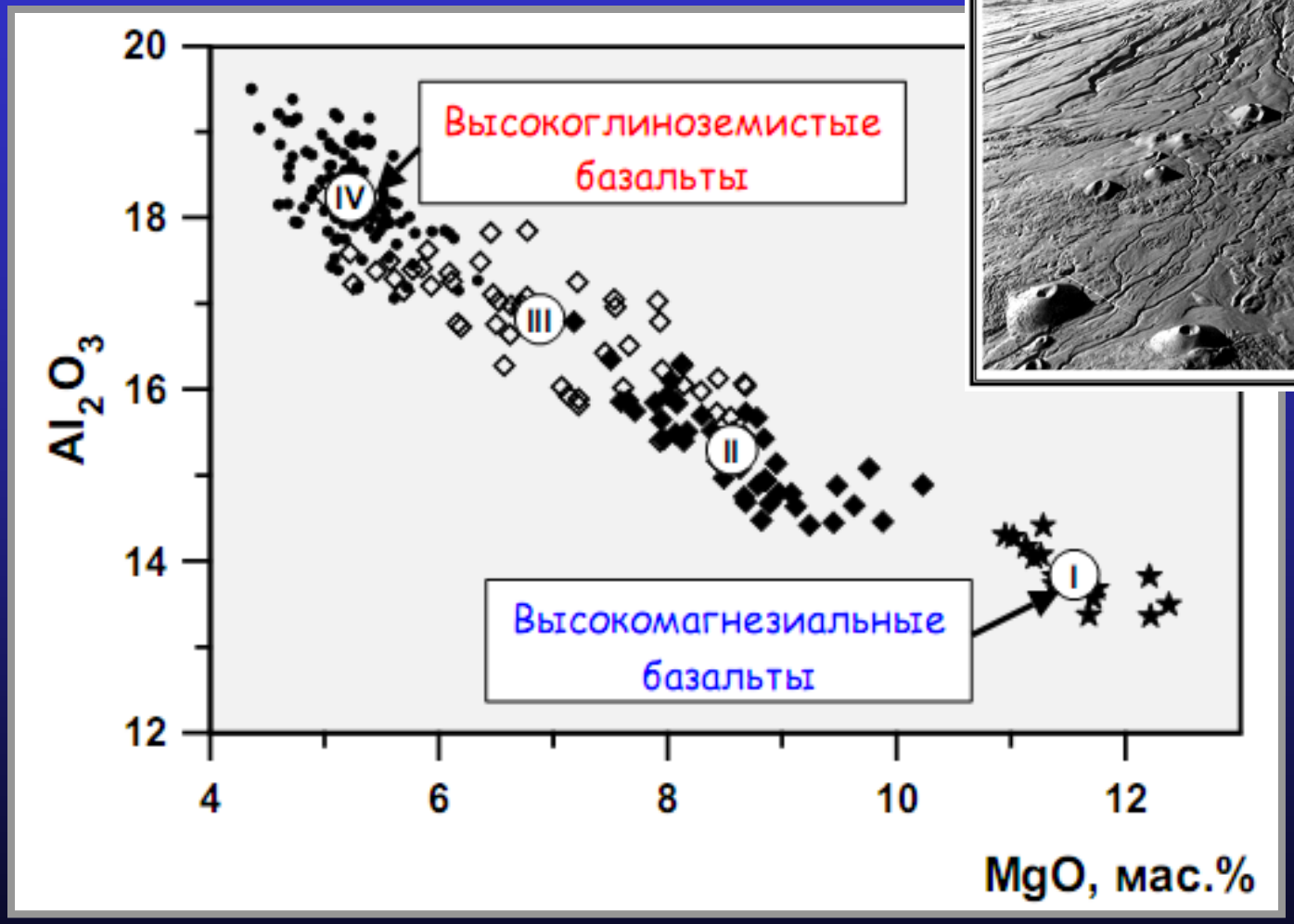
Вулканы Ключевской, Безымянный и Камень

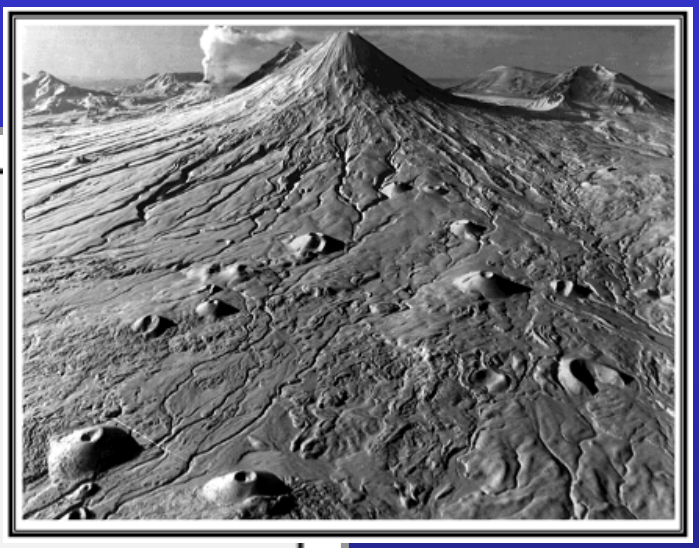
Схема извержений влк. Ключевской и Безымянный



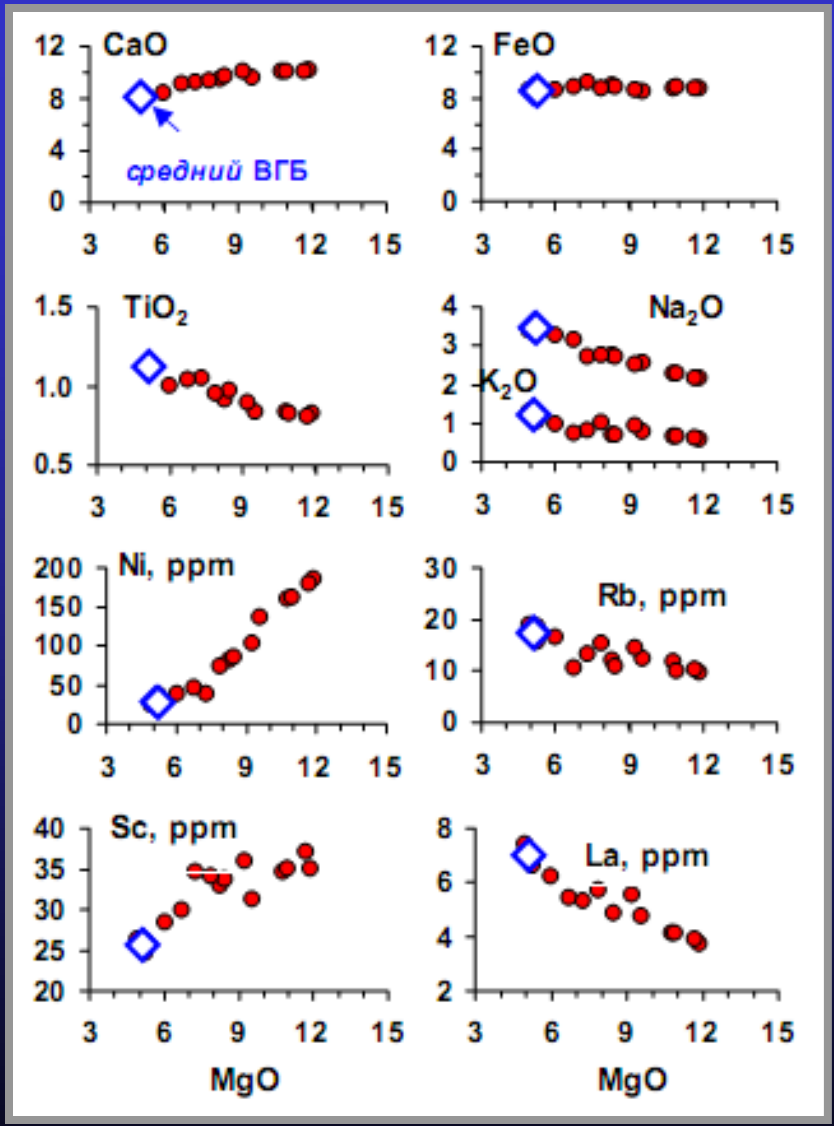
1 - кальдера влк. Безымянный, 2 - побочные прорывы,
3 - паразитические конуса, 4 - экструзивные купола,
5 - пирокластический поток 1956 г., 6 - отложения 1956 г.

Эволюция содержаний MgO и Al_2O_3 в базальтах Ключевского вулкана



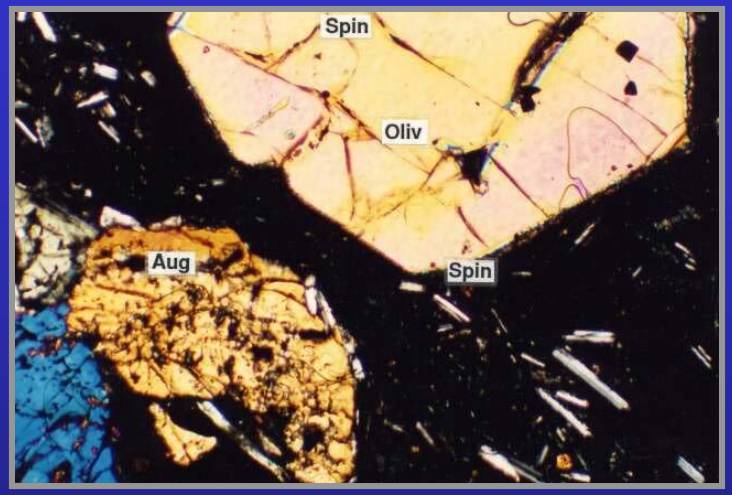


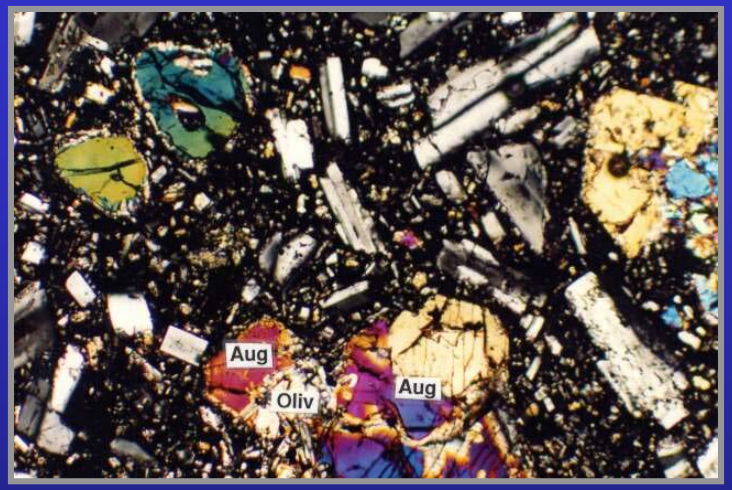
Химический и нормативный состав базальтов Ключевского вулкана



Тип	Высоко-Mg (I)	Магнезиальный (II)	Глинозёмистый (III)	Высоко-Al (IV)
n	15	46	50	131
SiO_2	51,76	53,39	53,22	53,50
TiO_2	0,86	0,84	0,95	1,09
Al_2O_3	13,86	15,29	16,79	18,26
FeO	8,83	8,52	8,83	8,67
MnO	0,17	0,17	0,17	0,16
MgO	11,55	8,58	6,89	5,24
CaO	9,73	9,41	8,91	8,22
Na_2O	2,47	2,72	3,11	3,45
K_2O	0,63	0,90	0,96	1,20
P_2O_5	0,15	0,18	0,18	0,20
Mg/(Mg+Fe)	0,699	0,641	0,580	0,517
Ca/(Ca+Al)	0,561	0,528	0,491	0,450
CIPW, мас.%				
Or	3,72	5,32	5,67	7,09
Ab	20,90	23,01	26,31	29,19
An	24,88	26,86	29,02	30,80
Di	18,18	15,24	11,54	7,20
Hy	17,93	25,04	21,96	21,15
Ol	12,42	2,52	3,28	2,02
Ilm	1,63	1,60	1,80	2,07
Ap	0,36	0,43	0,43	0,47

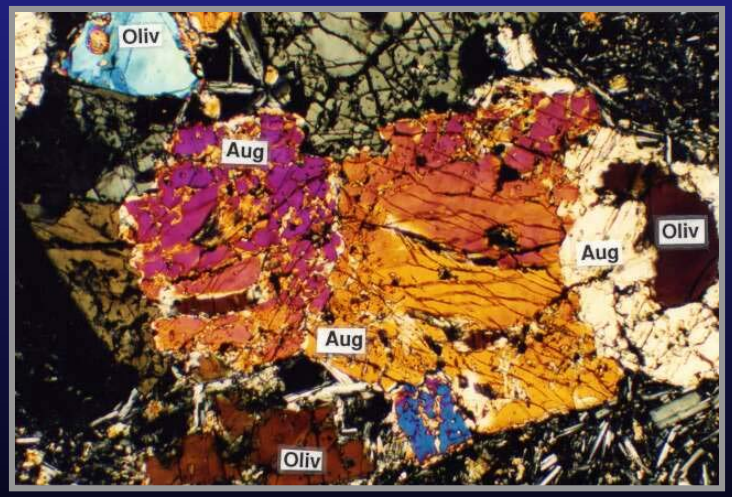
Структуры высоко-Mg и высоко-Al базальтов Ключевского вулкана

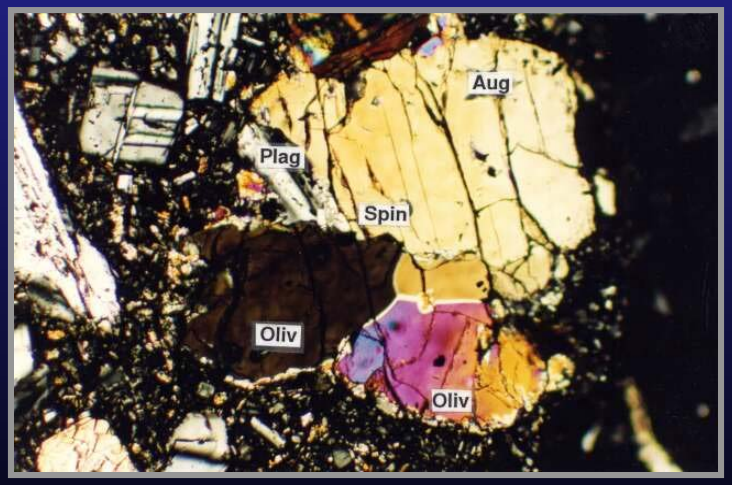




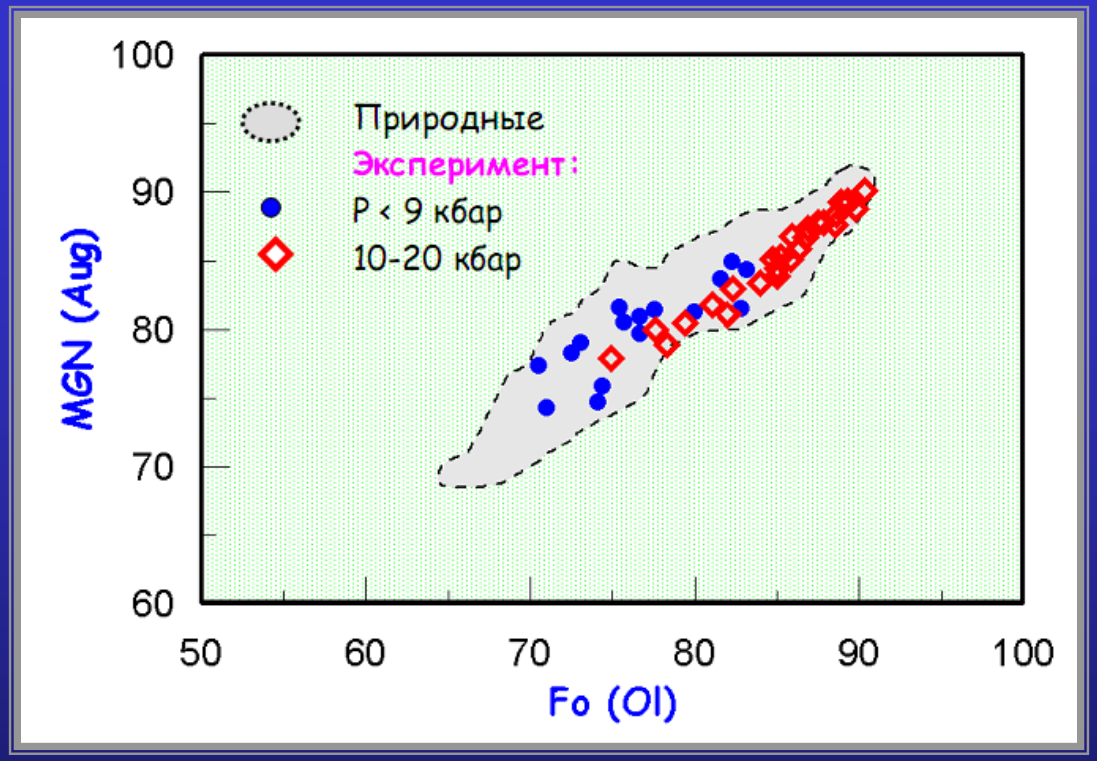
Высокомагнезиальные базальты

Высокоглиноземистые базальты





Эволюция составов породообразующих минералов



Составы природных и экспериментальных Ol и Cpx

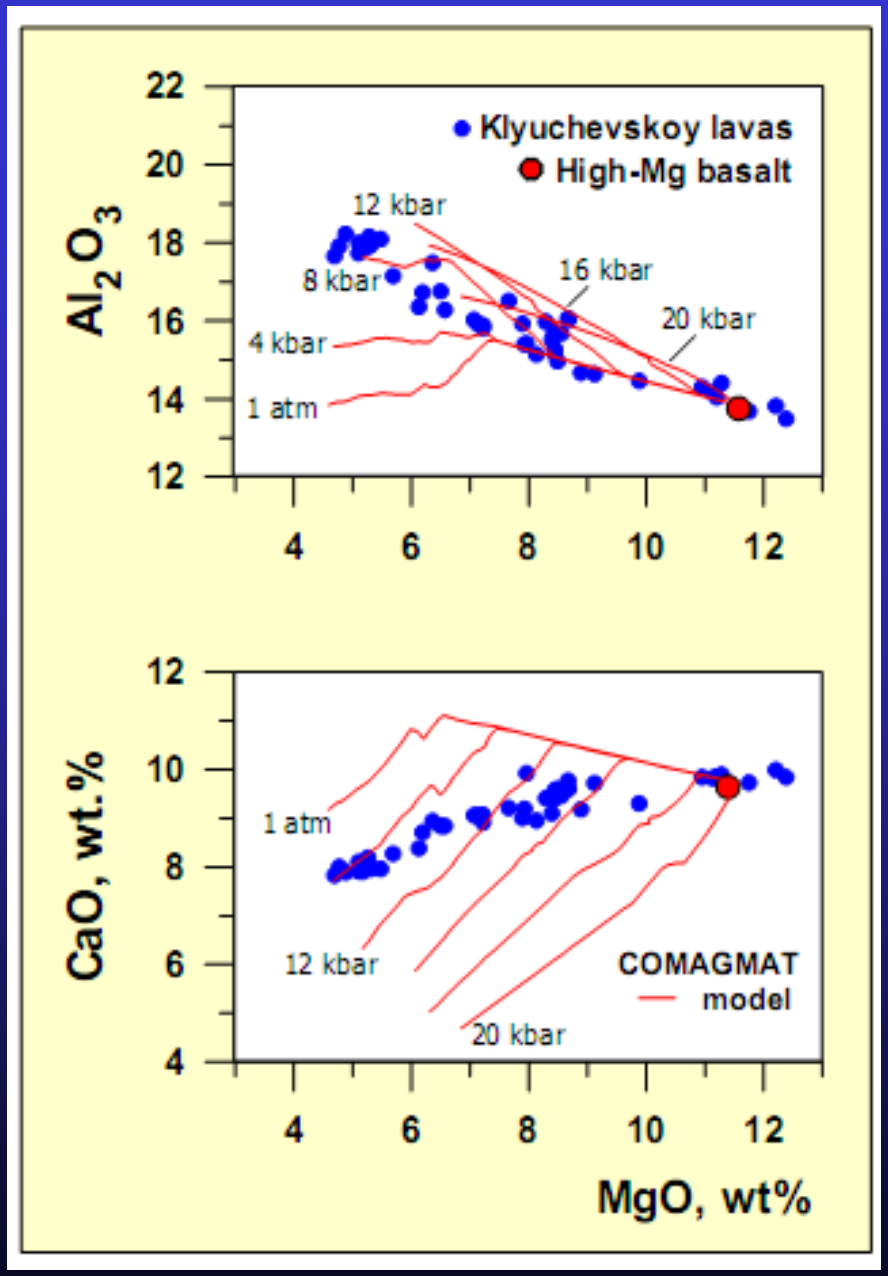
Последовательность кристаллизации ключевских магм

$$\mathbf{Ol}\ (Fo_{90}) + \mathbf{Aug}\ (mg\#_{90}) \pm \mathrm{Cr}\text{-}\mathbf{Sp} \Rightarrow$$

$$\mathbf{Ol}\ (Fo_{86}) + \mathbf{Aug}\ (mg\#_{87}) \pm \mathbf{Opx}\ (mg\#_{87}) \pm \mathrm{Cr}\text{-}\mathbf{Sp} \Rightarrow$$

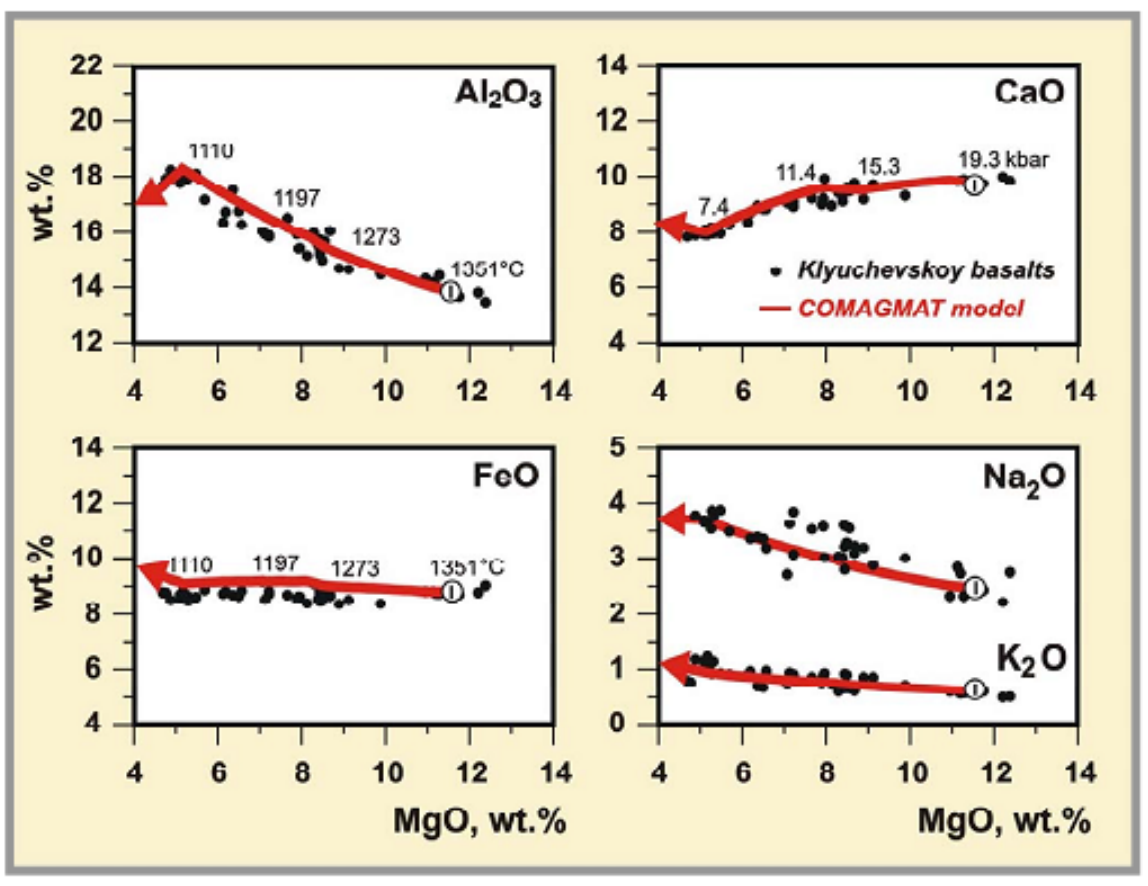
$$\mathbf{Ol}\ (Fo_{76}) + \mathbf{Aug}\ (mg\#_{79}) + \mathbf{OPx}\ (mg\#_{78}) + \mathbf{Sp} + \mathbf{Pl}\ (An_{65\text{-}77})$$

Численное моделирование изобарической фракционной кристаллизации расплава высоко-Mg базальта при разных давлениях



Природный петрохимический тренд пересекает модельные линии изобарической кристаллизации исходного расплава в интервале давлений 1 атм – 20 кбар

Оптимальная модель декомпрессионного фракционирования



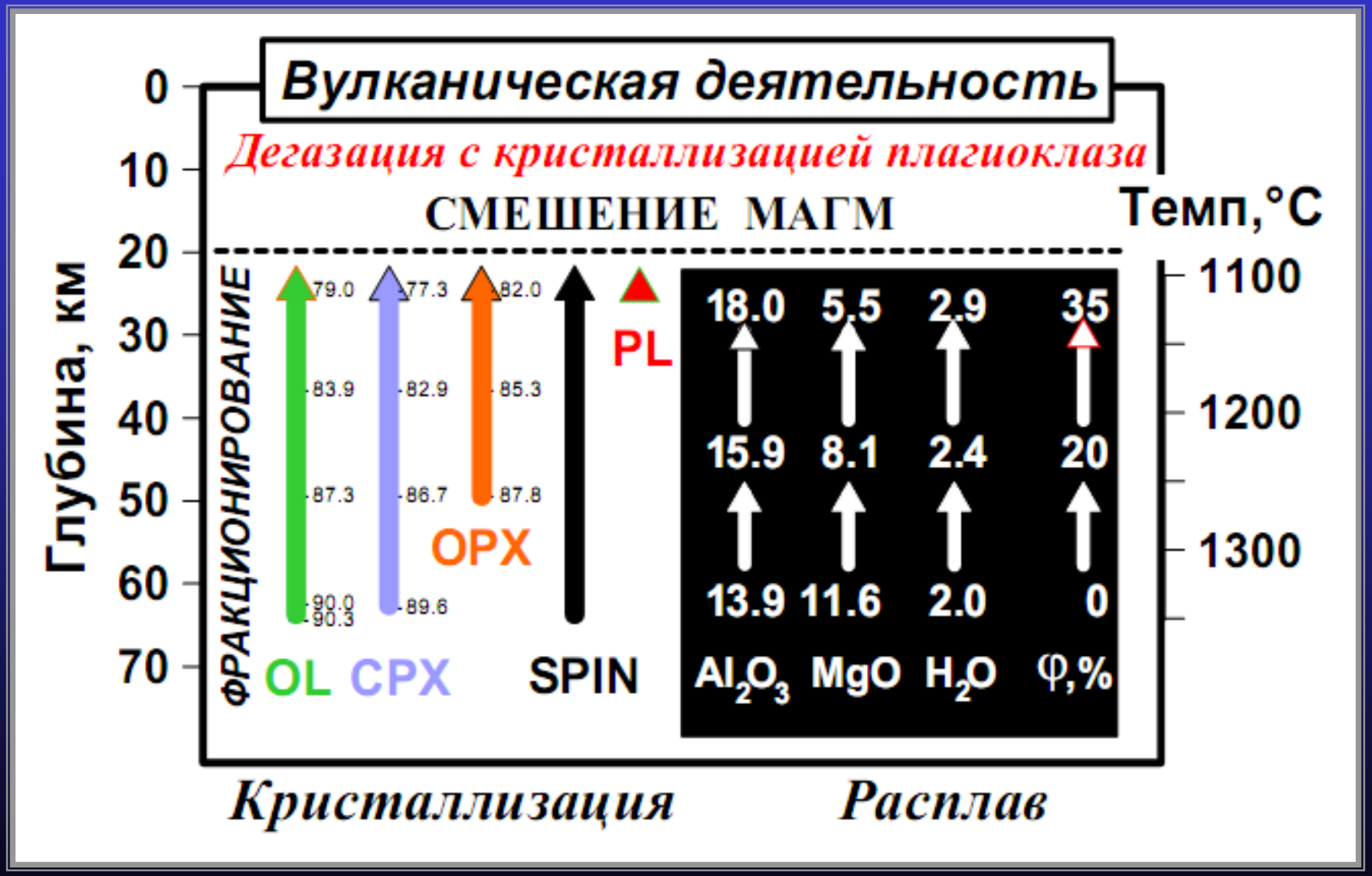
Переход высоко-Mg в высоко-Al базальты отвечает ~40% фракционированию ассоциации Ol-Aug-Sp в интервале давлений от 19 до 7 кбар.

При этом температура магмы понижалась от 1350 до 1100°C.

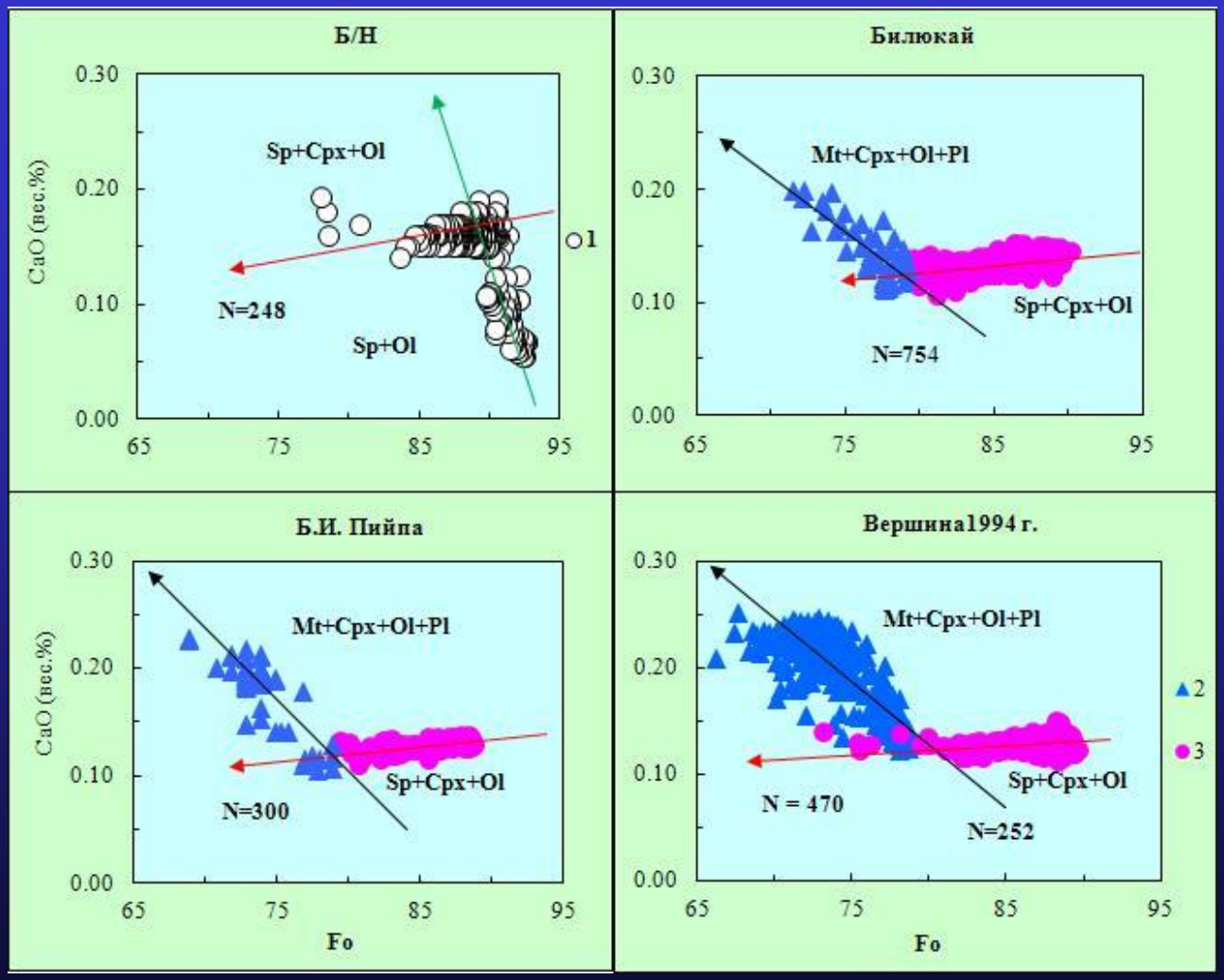
Содержание воды в исходном расплаве составляло 2 мас.%.

Накопление воды в расплаве по мере кристаллизации привело к значительной задержке кристаллизации Pl и образованию высокоглиноземистых дифференциатов, содержащих > 18 мас.% Al_2O_3

Схема химической и фазовой эволюции магматизма Ключевского вулкана



Ca в ключевских оливинах – как свидетельство полибарического фракционирования !?

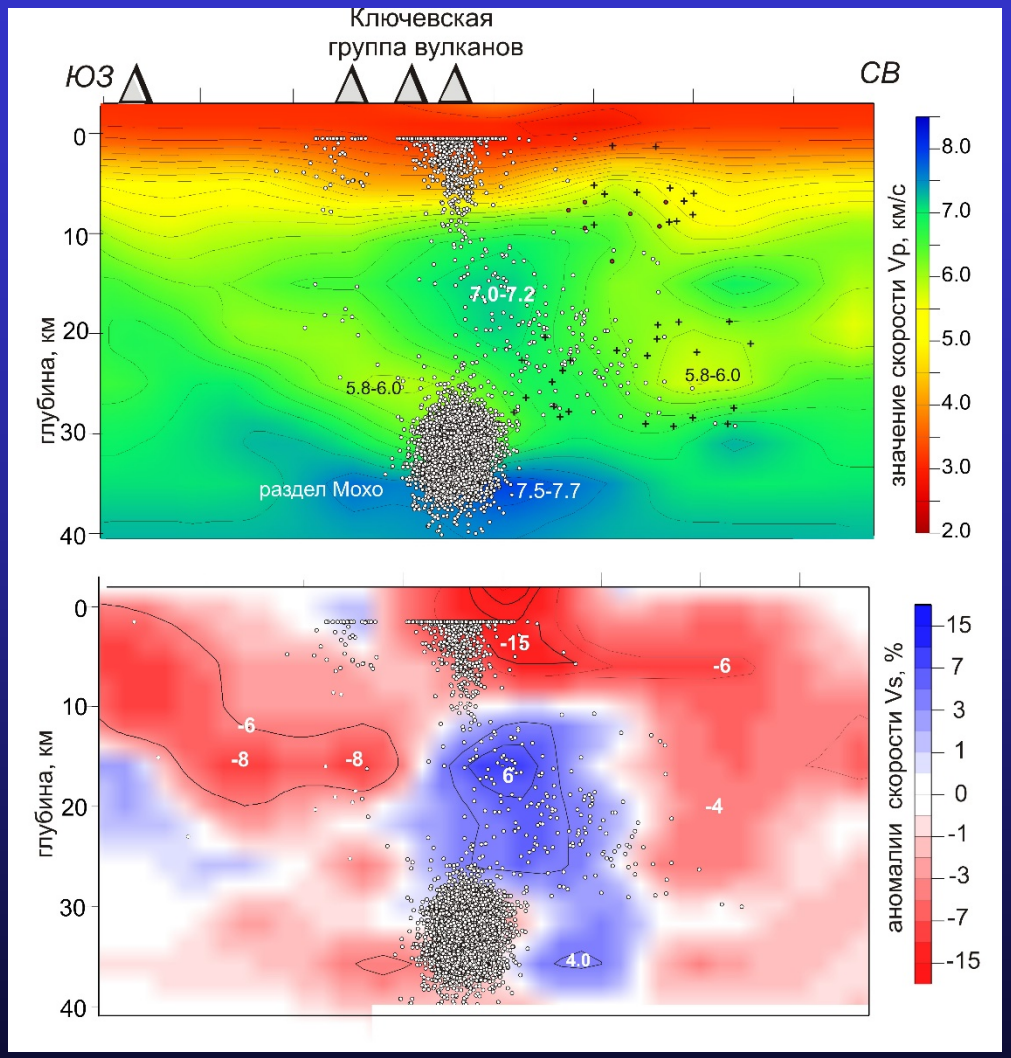


- Исследовано несколько тысяч составов Ol и Cpx из магнезиальных и высоко-Al базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской.
- Дуализм распределения CaO и Al_2O_3 в оливинах указывают на внедрение магнезиальной магмы из глубинного очага в малоглубинную “высокоглиноземистую” камеру.
- Петрологические данные находятся в соответствии с сейсмическим данными о строении земной коры под вулканами.

С.А. Хубуная, Л.И. Гонтовая, А.В. Соболев, В.С. Хубуная «К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской (Камчатка). Вулканология и сейсмология, № 2, 2018 г.

Вертикальный разрез земной коры

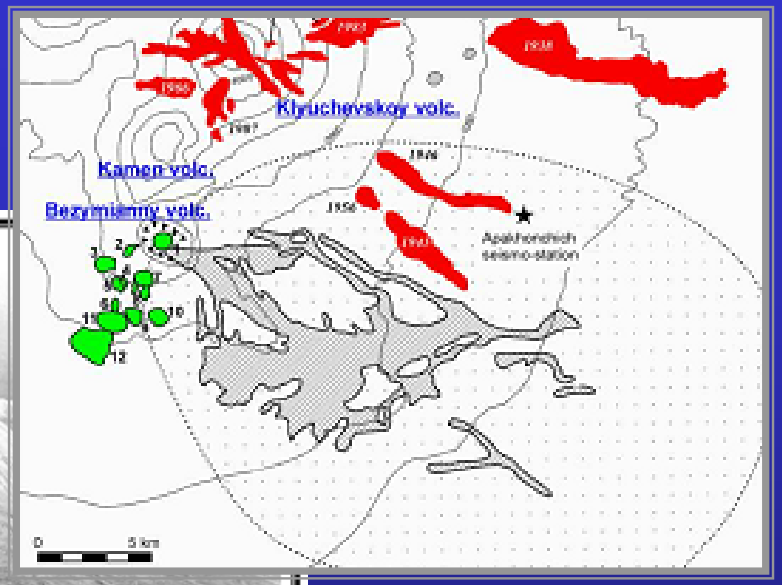
в аномалиях Vp и Vs под Ключевской группой вулканов



Изолинии абсолютных значений сейсмических скоростей и (*кружками*) гипоцентры вулкано-тектонических землетрясений

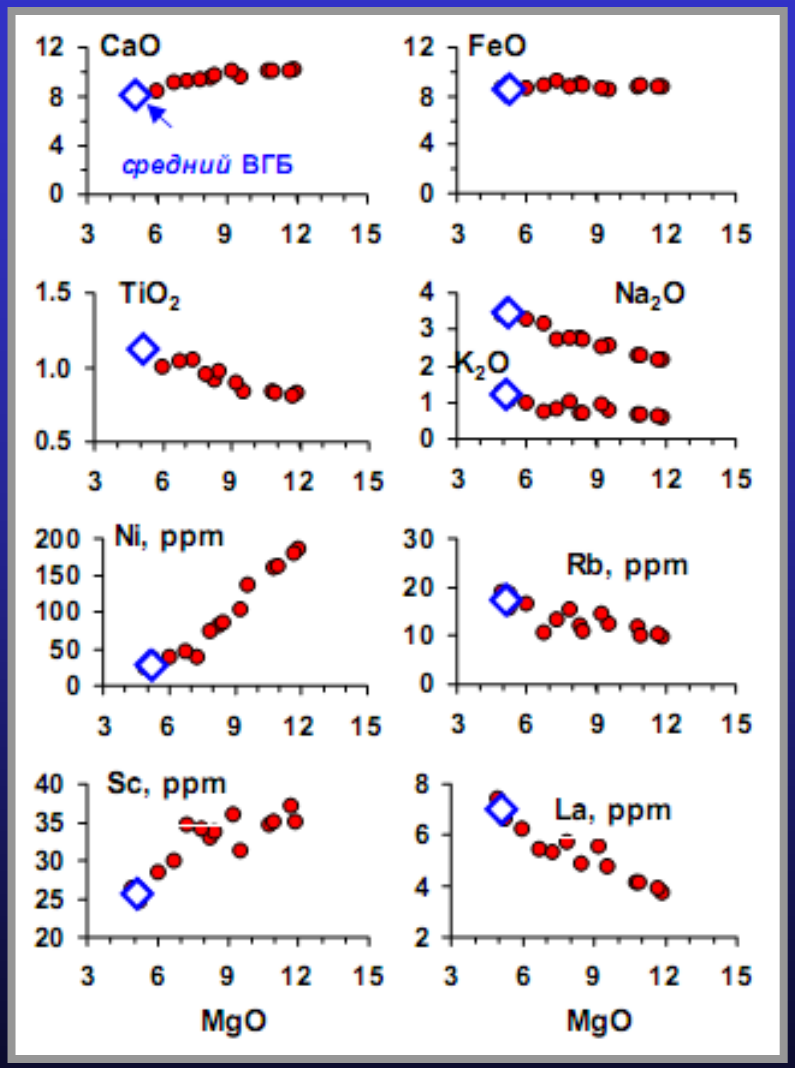
С.А. Хубуная, Л.И. Гонтовая, А.В. Соболев, В.С. Хубуная «К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской (Камчатка). Вулканология и сейсмология, № 2, 2018 г.

Эволюция магматизма вулкана Безымянный

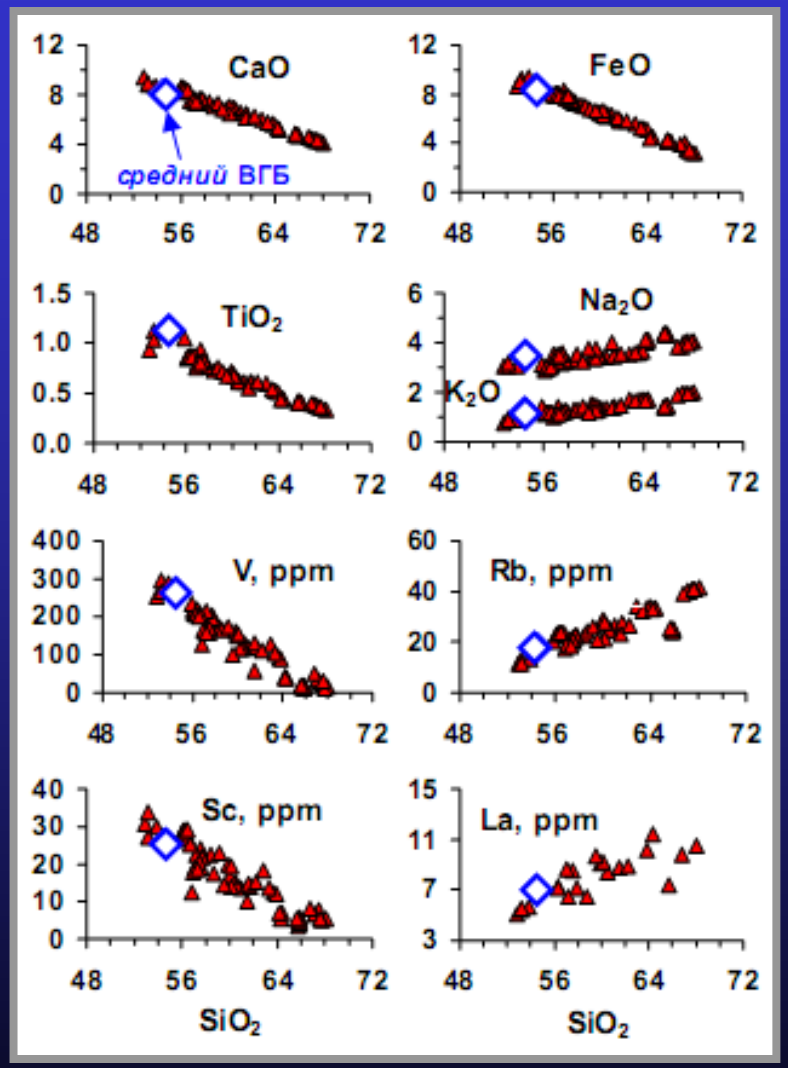


Общий вид вулкана Безымянный

Вариации химического состава базальтов Ключевского и лав вулкана Безымянный

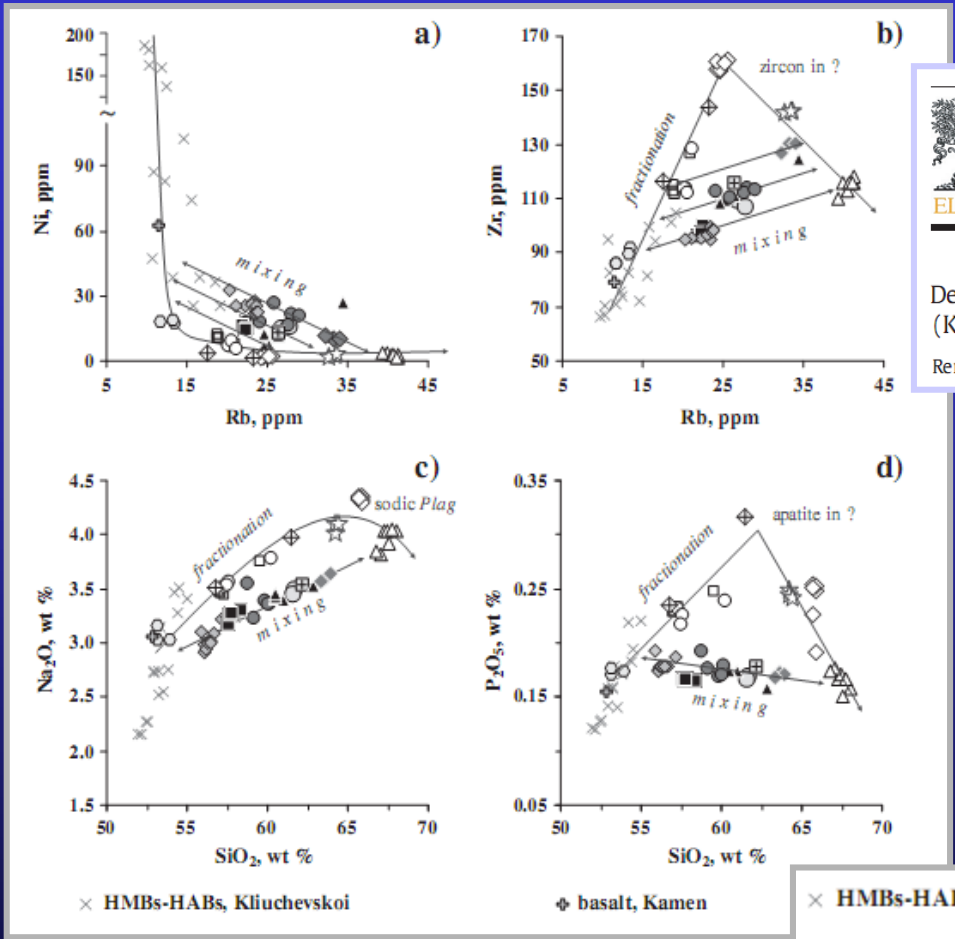


Влк. Ключевской



Влк. Безымянный

Вариации химического состава вулканитов Ключевского Безымянного – *признаки смешения*



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Volcanology and Geothermal Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jvolgeores

Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions

Renat R. Almeev [a,*], Jun-Ichi Kimura [b], Alexei A. Ariskin [c], Alexey Yu. Ozerov [d]

× HMBs-HABs, Kliuchevskoi

basalt, Kamen

pre-Bezymianny (>10-11 ky)

- *Plotina Dome*
- *Stupenchaty Dome*
- *Dvuglavy Dome*
- *Pravilny and Gladkii Domes*
- *Raschlenenny Dome*

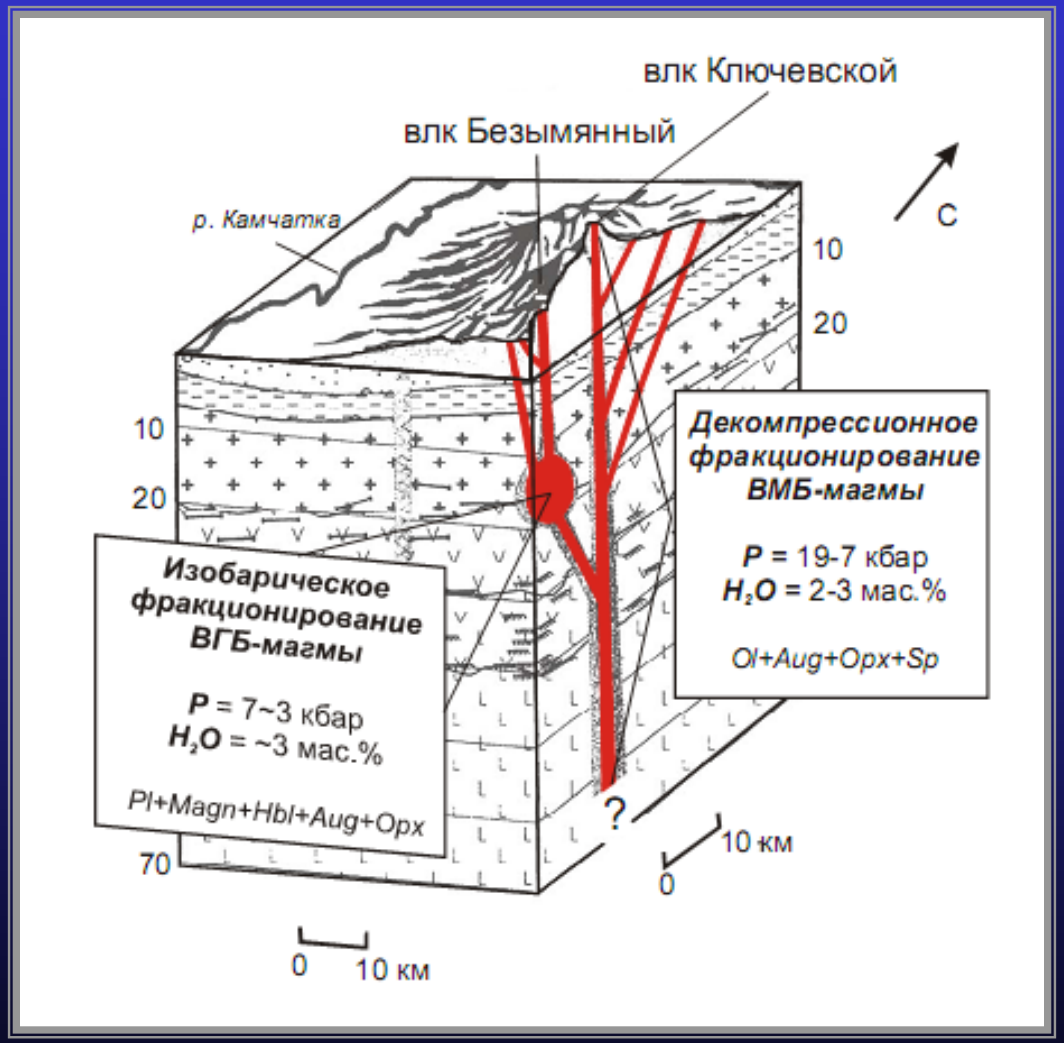
Bezymianny (< 4.7 ky)

B-I
- *LF-II*
- *Greben Dome*
- *Treugolny Zub Dome*
- *Expedition Dome*
- *basaltic andesites*

B-II
- *LF-IV*
- *Lokhmaty Dome*

B-III
- *PF-1997*
- *LF-VI*

Гипотетическая схема питания вулканов Ключевской и Безымянный



Высокоглиноземистые магмы как продукты фракционирования мантийного источника ключевских магм являются родительскими для более кислых андезитов вулкана Безымянный.

По Озерову и Альмееву с дополнениями (1995)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ О ПРИРОДЕ

андезит-базальтового магматизма островных дуг

Высокие содержания H_2O в исходных магмах

> *эксплозивность извержений*
> *amp фенокристы*
> *высокая глиноземистость выплавок*
> *связь с f_{O2} - ранняя кристаллизация Ti-Mt*

ИЩ тренды – *результат фракционной кристаллизации высоко-Mg и высоко-Al магм*

Высокие LILE/HFSE – *плавление в условиях “мантийного клина” (надсубдукционной мантии)*

^{10}Be, B – *присутствие “субдукционного компонента”*

Поперечная зональность - *связь с глубиной очага + снижение степени плавления (от желоба)*